

CHAPITRE. I. Analyse de la formation du copeau

CARACTERISATION DE LA COUPE DES METAUX

La caractérisation de la coupe est basée sur l'observation du phénomène, l'établissement de modèles et par la suite la vérification expérimentale, cette procédure a été suivie par la plupart des chercheurs du domaine. *Tresca* en 1878 a noté que, pour un outil à géométrie constante, une profondeur de passe insuffisante provoque des déformations plastiques importantes, contrairement à des passes plus épaisses. À l'époque, ses observations ont permis aux artisans le développement de machines plus rigides et plus puissantes. Par la suite, *Mallock* en 1881 a établi que le copeau est le résultat du cisaillement du matériau à usiner, où les déformations dépendent du frottement entre la face de coupe de l'outil et le copeau (figure I.1 b). *Taylor* (1907) a aussi émis des théories qui restent jusqu'à aujourd'hui une base pour estimer la durée de vie d'un outil de coupe. [1]

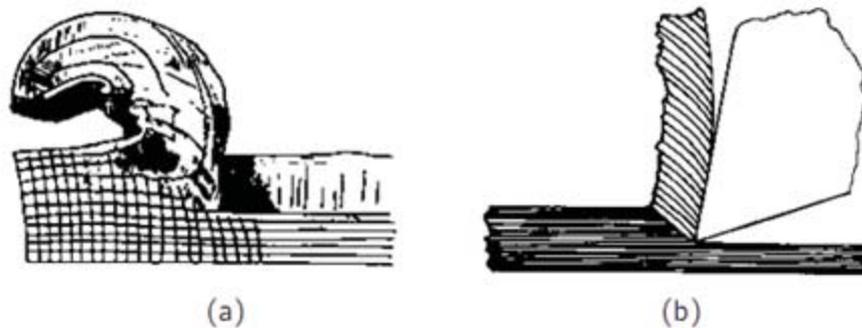


Figure.I.1. Observations de la coupe des métaux (d'après Tresca et Mallock).[1]

Définitions :

La coupe est l'interaction entre l'outil et la pièce à usiner, il en résulte de se contactent des résidus (déchets) appelés copeaux.

Au contact de l'outil en mouvement et la pièce brute où semi-finie, commence l'écoulement du copeau.

PHENOMENES PHYSIQUES EN USINAGE

Les effets physiques observés en usinage sont classés en quatre catégories : mécaniques, thermiques, chimiques et tribologiques.

Les quatre phénomènes physiques sont dépendants l'un de l'autre et interfèrent par leurs effets. La puissance et la robustesse de la machine, le montage et le mode de fixation des pièces, et même les aptitudes des opérateurs sur la machine, affectent également les résultats d'usinage. Tout en agissant sur ces paramètres, afin de donner de bonnes conditions de travail à l'outil, ce dernier se détériore et devient défaillant.

L'opération d'usinage est observée par la production de copeaux donnant lieu à des processus physiques qui sont à l'origine des :

- Modifications cristallines ;
- Déformations élastiques, plastiques puis rupture de matière à usiner.

Le contact entre l'outil et la pièce donne aussi un frottement importé causant ainsi :

- Un dégagement de chaleur ;
- Des microsoudures ;
- La formation d'arête rapportée sur la face de coupe de l'outil.

L'analyse et le traitement correct des conditions de coupe, de la forme de la partie active de l'outil, de la nuance et d'autres facteurs permettent aux opérateurs d'atteindre un processus de coupe productive et rentable.

FORMATION DU COPEAU

La surépaisseur de matière à enlever c'est la couche qui va former le copeau sous l'action mécanique complexe d'un outil de coupe, en utilisant une machine-outil comme le tour, la fraiseuse, la perceuse ou la scie ...etc. l'analyse et la compréhension du processus de formation du copeau est nécessaire pour l'amélioration et le développement des machines-outils et les moyens de coupe.

L'accumulation de matière devant l'outil (étape 2) génère des forces très importantes d'action de l'outil et de réaction de la part de la pièce, jusqu'à qu'il a détachement de matière de la pièce (étape 3) par déformation élastique, plastique puis rupture.(Figure I.2)

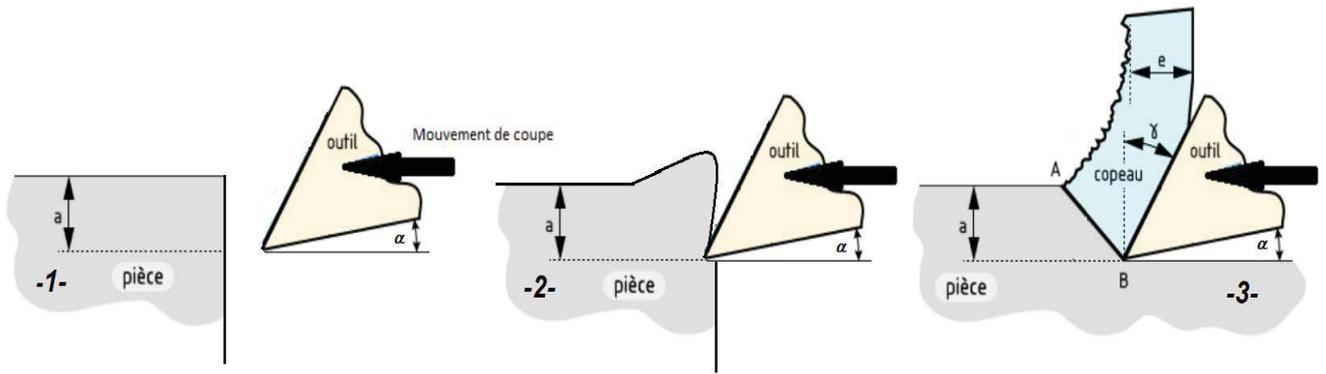


Figure.I.2. Etapes de formation de copeau [cours-et-exercices.com]

La majorité des études en **coupe orthogonale** ont établi que le copeau est formé de lamelles de matière orientées suivant une direction bien définie. Le copeau se détache de bloc de la pièce par l'effet de cisaillement entre deux lamelles avoisinantes aux bords de l'outil (B). le plan de cisaillement des lamelles de copeau est orienté suivant la droite AB. Une fois la coupe amorcée le processus se répète avec avance de l'outil sur la pièce, le copeau en se détachant glisse sur la face de coupe de l'outil où il sera dégagé. La trainée de l'outil face à la face de dépouille génère la surface usinée.

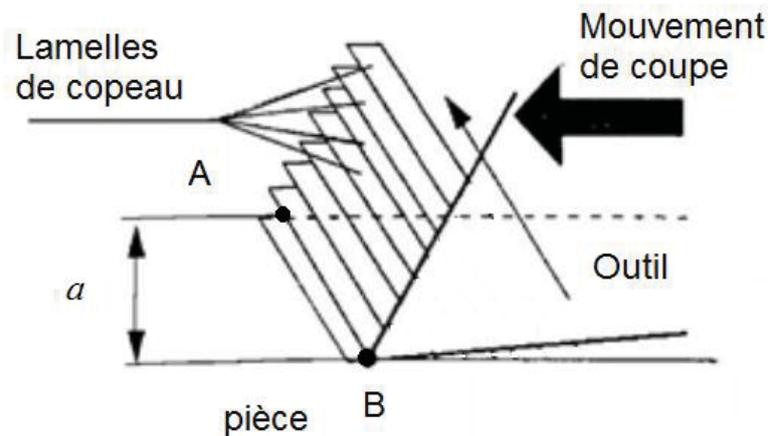


Figure.I.3. Formation de copeau - analogie du paquet de cartes [cours-et-exercices.com]

À l'échelle microscopique ou d'un grain monocristallin le glissement de lamelles de copeau est réellement un glissement entre particules isolées d'un grain ou même au sein du grain poly- cristallin. Le déplacement des grains s'accompagne nécessairement d'un échauffement important et suivi d'une modification des propriétés mécaniques de la surface générée par la coupe qui devient plus dure et plus fragile par rapport au cœur de la pièce. (Figure I.4 et I.5)

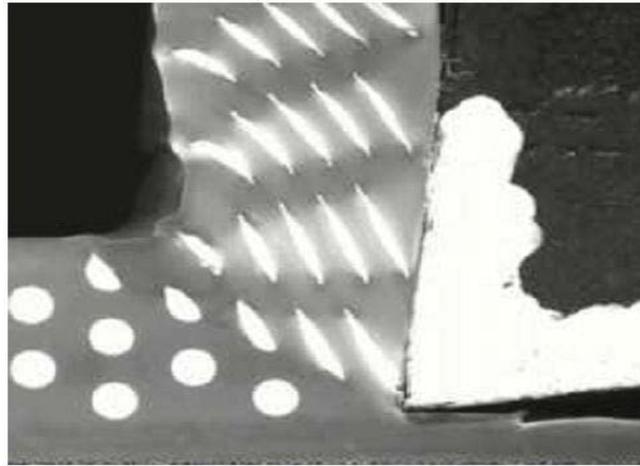


Figure.I.4. Déplacement et déformation des grain monocristallin en coupe orthogonale.

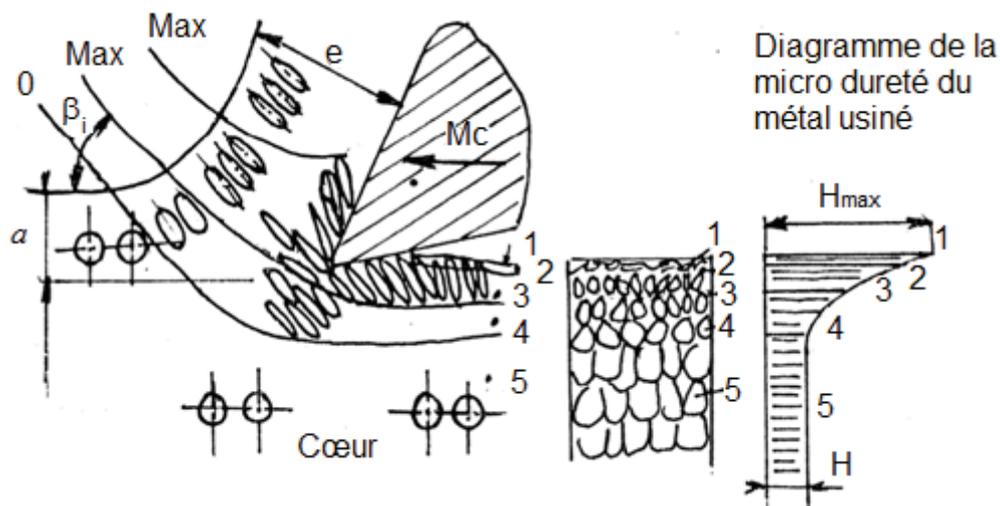


Figure.I.5. Formation de copeau à l'échelle cristalline.[5]

ZONES D'ELABORATION DU COPEAU

À l'échelle mésoscopique, l'étude de la formation de copeau et l'interférence entre la pièce/outil coupant sont faites à un plan plus large que l'échelle microscopique. Plusieurs études ont montré qu'au voisinage de l'espace arête copeau pièce est caractérisé par l'apparition de zones de sollicitation très remarquables. Ces zones sont localisés par le principe de l'interaction mécanique des matériaux (Analyse thermomécanique) et le processus de coupe (Analyse tribologique). En coupe orthogonale quatre zones sont mises en évidence. (Figure I.6)

1. Zone morte ou zone de séparation du métal ou aussi zone de forte pression hydrostatique
2. Zone de cisaillement primaire;
3. Zone de cisaillement secondaire ou zone de frottement intense;
4. Zone de dépouille principale ou zone de cisaillement tertiaire.

Zone 1 : zone de séparation du métal en deux fractions par l'arête de coupe au point (O). Cette section de l'outil est une zone confinée en un point embryonnaire de sortie de copeau sous de fortes pressions hydrostatiques et aussi c'est elle qui est le point générateur de la surface usinée. Vu les efforts de compression importants, il en résulte des élévations de température qui avoisine les 600°C (Figure I.7). [7]

Zone 2 : zone de formation du copeau où on observe un changement brutal d'orientation et de vitesse d'écoulement de la matière, de la direction de la vitesse de coupe VC au sens d'écoulement du copeau, en provoquant un glissement plastique limité par l'espace (LEHQ) et un important flux de chaleur transmis à l'outil. [6]

Zone 3 : zone de glissement à l'interface copeau / face de coupe, il a été constaté dans des études expérimentales et numériques, qu'un phénomène d'adhésion freine considérablement l'écoulement de la matière causant un cisaillement plastique de la matière. Le frottement copeau / face de coupe est assez intense qu'il génère une chaleur d'environ les 750°C (Figure I.7), ajoutant celle de la zone de cisaillement primaire, elle peut atteindre la température de fusion du matériau usiné. [10]

Zone 4 : cette zone est localisée à l'interface face de dépouille / surface usinée, où un frottement de glissement est observé, donnant naissance à des phénomènes d'adhésion conduisant à un cisaillement plastique de faible intensité par rapport à la zone 3. Une forte pression sur la surface usinée est accompagnée d'un état de surface et une rugosité médiocre. [6,7]

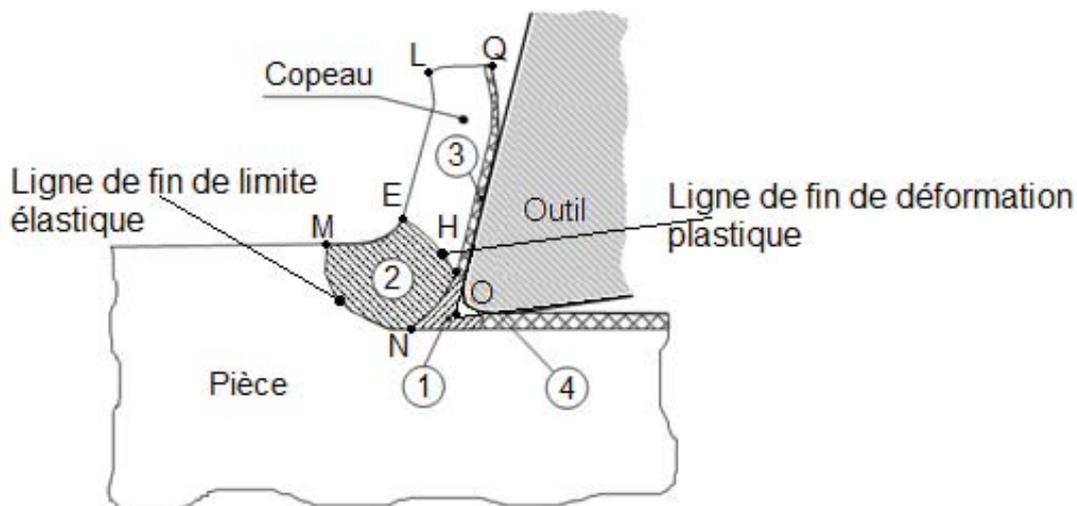


Figure.I.6. Observation des zones en coupe orthogonale [6,7]

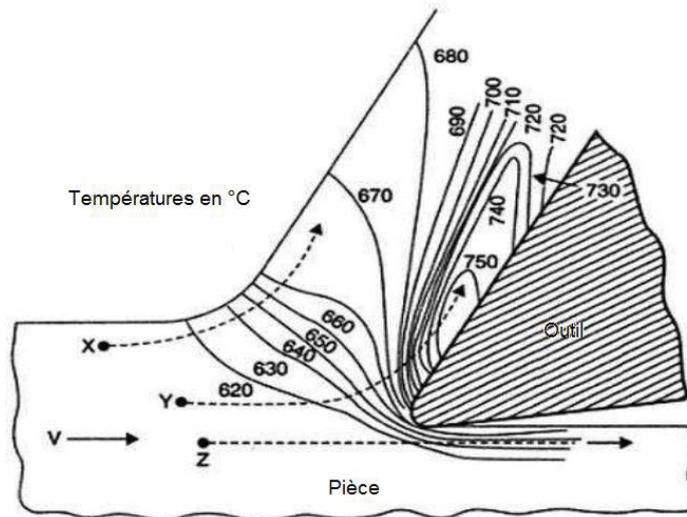


Figure.I.7. Distribution des températures en coupe orthogonale [11]

FORMES DU COPEAU EN USINAGE

La complexité du mécanisme de formation de copeau, ne nous permet pas de maîtriser complètement les résultats de la coupe en matière de forme et de nature du copeau obtenus. Les copeaux peuvent être classifiés en deux types distincts : *continu*, *discontinu*. [9,12]

1. Les copeaux continus avec ou sans bande : formés dans un état de déformation plastique stationnaire en cisaillement adiabatique. (Figure I.8)
2. Les copeaux discontinus avec ou sans segmentation : formés dans un état de déformation plastique non stationnaire. La segmentation des copeaux est pilotée par les phases de fissuration et de rupture du matériau à usiné. (Figure I.9)

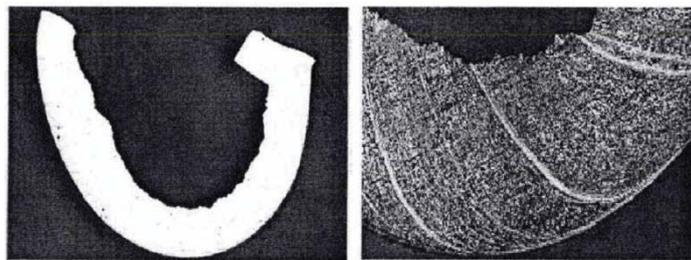


Figure.I.8. Copeau continu à surface lisse sans bande de cisaillement et copeau continu à surface lisse avec bande de cisaillement (d'après Heim 96, Sutter 97 et Faure 98). [12]

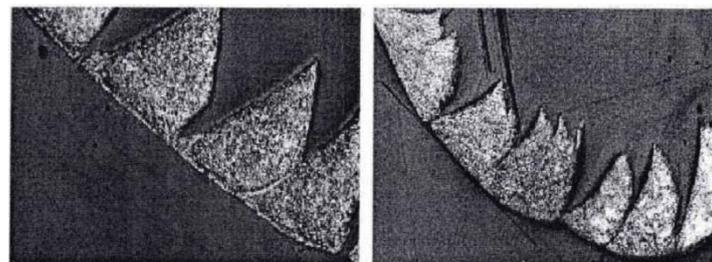


Figure.I.9. Copeau segmenté régulier et copeau segmenté irrégulier (d'après Heim 96, Sutter 97 et Faure 98). [12]

Il existe aussi d'autres copeaux intermédiaires entre un copeau continu et un copeau discontinu et d'autres géométries. (Figure I.10)

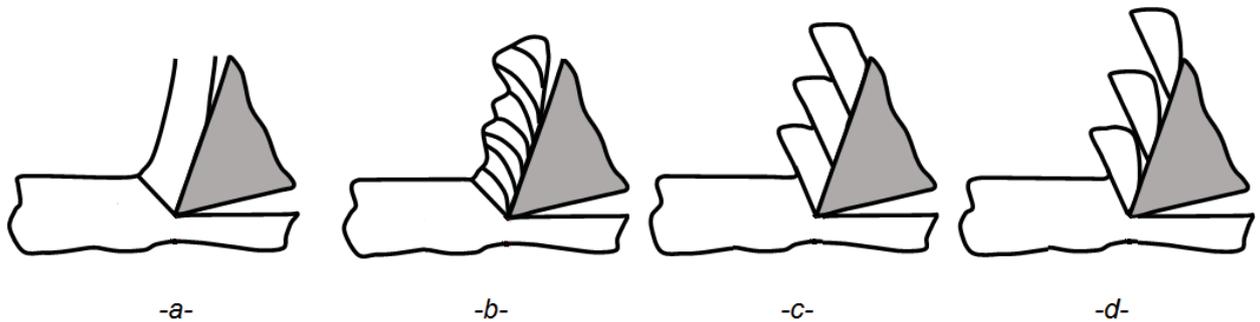


Figure.I.10. Formes de copeau en coupe orthogonale : a) copeau continu, b) copeau ondulé, c) copeau segmenté, d) copeau fragmenté (d'après Wagner 12). [4]

Des travaux de recherche ont établi que plusieurs paramètres entrent en jeu dans la formation du copeau. Ils dépendent de la matière de la pièce à usiner, des paramètres de coupe et de la forme de l'outil.

Coupeaux continus

Le copeau continu n'est formé que par un processus de déformation plastique par cisaillement au niveau de la zone primaire, sans écoulement continu le long de la face de coupe de l'outil, du fait que la valeur de la contrainte de cisaillement ne dépasse pas le point de rupture du métal. Le copeau continu se manifeste en coupe de métaux ductile est à faible profondeur de passe à et vitesse de coupe V_c (Figure I.11) (d'après Heim 96 et Faure 93). [12]

Coupeaux discontinus

Un phénomène d'instabilité dans la zone de cisaillement primaire conduit à la rupture du matériau qui donne un aspect discontinu aux copeaux. Un mode de rupture fragile peut être observé pour la coupe des matériaux durs et un autre mode de rupture du type ductile est constaté pour des matériaux moins durs mais à des vitesses de coupe plus importantes. (Figure I.11) (d'après Heim 96 et Faure 93). [12]

Une norme a été établie pour classer les copeaux obtenus en usinage, tableau I.1 (NFE 66 505).

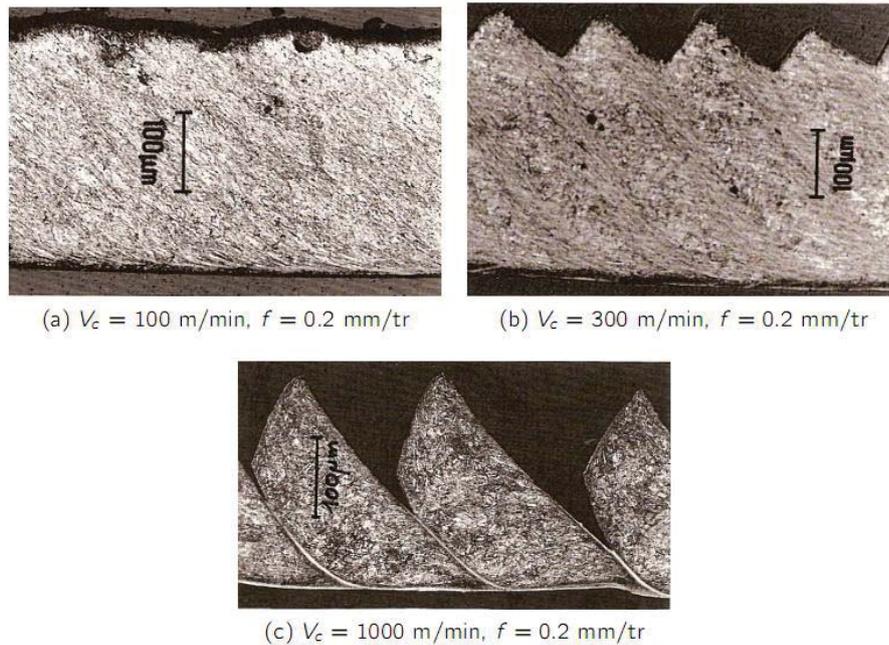


Figure.I.11. Copeaux obtenus à différentes vitesses de coupe (a) continu, (b) faiblement discontinu et (c) fortement discontinu (d'après Le Calvez 95).[1]

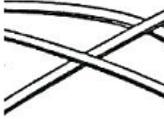
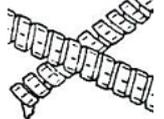
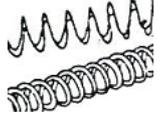
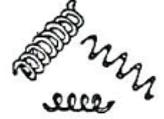
Remarque I.1

- Les professionnels en coupe des métaux conseillent à un usinage produisant un copeau court qui se fragmente facilement, qui est très avantageux par son:
 - ✓ Evacuation facile du copeau,
 - ✓ Pièce non rayée,
 - ✓ Meilleur état de surface,
 - ✓ Refroidissement de l'outil plus efficace,
 - ✓ Sécurité.
- Des diagrammes brise-copeaux sont à la disposition des professionnels pour contrôler la formation de copeau en donnant un choix des conditions de coupe profondeur de passe et avance en fonction des attributions de l'outil et la matière à usiné.

et il faut éviter :

- Un copeau long et filant qui entraîne une réduction de durée de vie de l'outil, provoqué par un échauffement excessif, un écaillage, une arête rapportée, une rupture de l'arête.
- Un copeau très fragmenté favorise l'apparition de vibrations de la pièce avec état de surface rugueux. [2]

Tableau I.1 Classification des copeaux selon la norme NFE 66505[8]

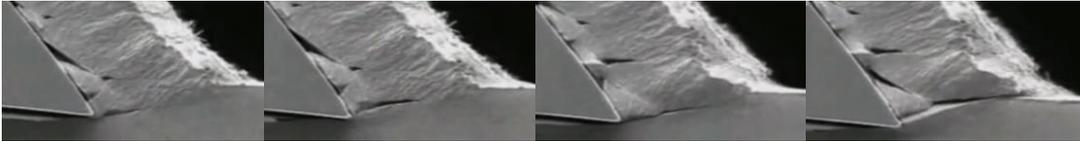
Types de copeaux	Formes		
1 : Copeau ruban	11 : Long 	12 : Court 	13 : Enchevêtré 
2 : Copeau tubulaire	21 : Long 	22 : Court 	23 : Enchevêtré 
3 : Copeau spirale	31 : Plat 	32 : Conique 	
4 : Copeau hélicoïdal en rondelle	41 : Long 	42 : Court 	43 : Enchevêtré 
5 : Copeau hélicoïdal conique	51 : Long 	52 : Court 	53 : Enchevêtré 
6 : Copeau élémentaire	61 : Enchevêtré 	62 : Détaché 	
7 : Copeau aiguille			
8 : Copeau en arc			

Références

- [1] D. GERMAIN, Développement d'un modèle d'efforts de coupe intégrant le contact en dépouille : application au tournage de super finition du cuivre Cu-c2. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, ParisTech, 2011. France, 2011.
- [2] C. GRUESCU, F. DEFOURNE, P. QUAEGEBEUR et J. F. ANTOINE, Préparation de production en productique mécanique - étude de fabrication et analyse d'usinage (3PM-EFAU), SEMM (Service Enseignement et Multimédia) / Université Lille1 – France, 2015.
- [3] John Wiley & Sons, Fundamentals of Modern Manufacturing, 2nd edition Inc. M. P. Groover, 2002.
- [4] Usinage par outil coupant, GN -3-PROFA, INSA Institute de sciences appliquées – Lyon – France, 2017.
- [5] S. BENZAADA, Coupe des métaux, Université Mohamed Khider – Biskra –Algérie.
- [6] F. DARGNAT, Modélisation semi-analytique par approche énergétique du procédé de perçage de matériaux monolithiques, Thèse de Doctorat en Mécanique, Université Bordeaux 1, France, 2006.
- [7] M. CHERIF, Modélisation générique des efforts de coupe en fraisage pour la CFAO et la surveillance de l'usinage, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France, 2003.
- [8] P. DEPEYRE, Fabrication mécanique, Licence de Technologie et Mécanique, Faculté des Sciences et Technologies, Université de la Réunion – France, 2005.
- [9] R. MOHAMMAD, Etude de l'évolution des caractéristiques des plaquettes de coupe en tournage à sec. Mise en place de critères d'aide à la décision du changement de plaquette. Application au cas de l'ébauche de turbines de pompage, thèse doctorat de l'Université Toulouse III - Paul Sabatier – Toulouse – France, 2011.
- [10] M HABA K : Etude de l'influence de la microstructure et des paramètres de coupe sur le comportement en tournage de l'acier a roulement 100Cr6. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2006.
- [11] R. RAJENDRAN, Theory of metal Cutting / Thermal aspects of Machining, Tool materials, Tool wear Cutting fluids and Machinability, Federal institute of science and technology – Kerala – Inde
- [12] M. NOUARI, Modélisation de l'usure par diffusion des outils de coupe en usinage à grande vitesse, Thèse de Doctorat de l'Université de Metz – France, 2000.
- [13] M. FONTAINE, Modélisation thermomécanique du fraisage de forme et validation expérimentale, Thèse de Doctorat de l'Université de Metz – France, 2004.

I - LE COPEAU

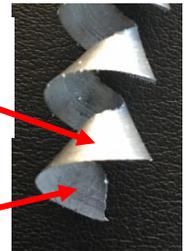
Un copeau est un fragment de métal enlevé avec un outil tranchant.



Le copeau idéal est de forme longue et en spirale (tirebouchon). Cette forme est due à la différence de tension qui existe entre la surface extérieure du copeau peu déformée et la surface intérieure qui est très chaude à cause du frottement entre l'outil et la pièce.

Coté
intérieur

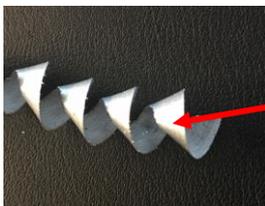
Coté
extérieur



II - LES DIFFERENTS TYPES DE COPEAUX

Il existe 3 types de copeaux :

- Les copeaux continus, ce sont ceux que l'on veut obtenir, ils résultent de variables d'usinage correctes. En fraisage, la coupe étant intermittente, on parle de copeaux continus segmentés.

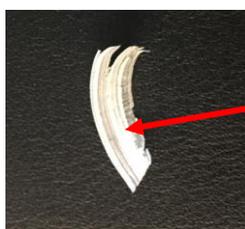


Continu

Continu
fragmenté



- Les copeaux arrachés, ce sont des copeaux mal formés dus à des profondeurs de passe ou avances trop importantes, parfois inévitables mais à éviter si possible.



Arraché

- Les copeaux adhérents, dus à une chaleur excessive, à éviter impérativement, résultent d'une vitesse de coupe trop grande ou d'un outil émoussé.

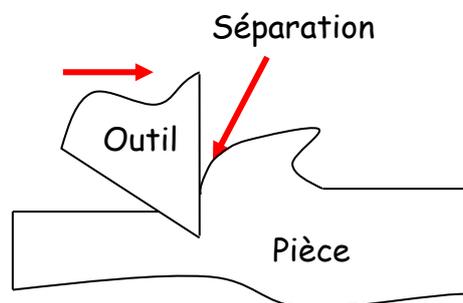
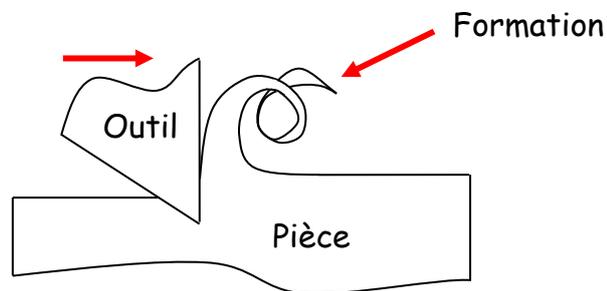
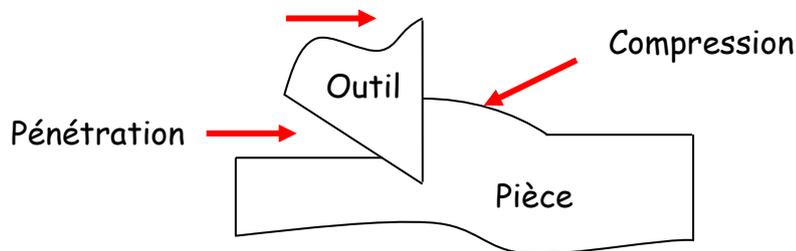


Adhérent

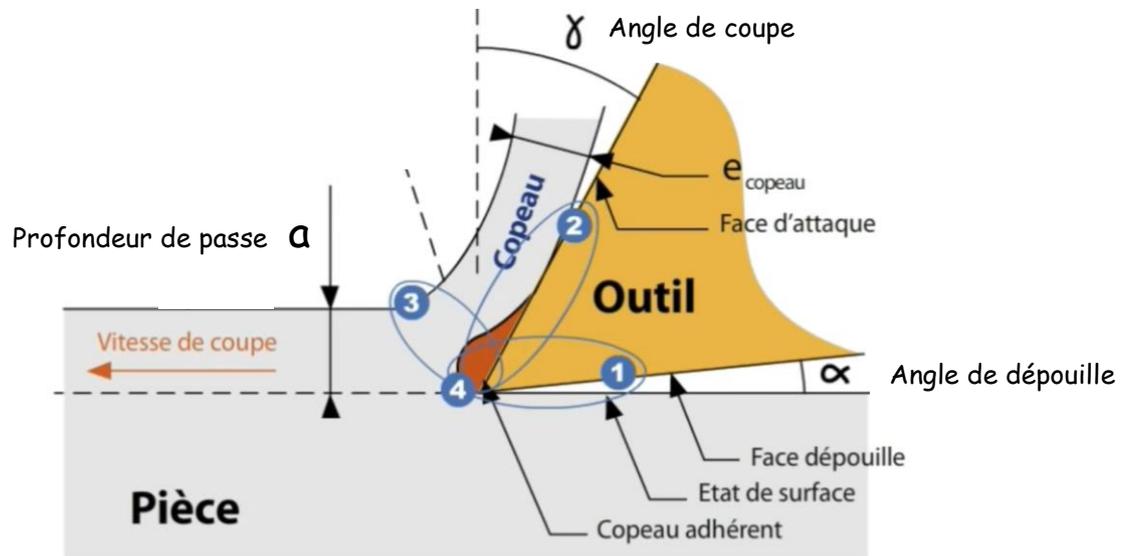
III - LES 4 PHASES DE FORMATION DU COPEAU

La formation du copeau se décompose en 4 phases :

- La pénétration : l'outil rentre en contact avec la pièce.
- L'accumulation (compression) : qui génère la montée en température.
- La formation : le copeau doit être continu.
- La séparation : causée par la différence de température. Le copeau doit se séparer le plus rapidement possible pour limiter la quantité de chaleur dans l'outil. Le copeau entraîne donc la chaleur.



IV - LES DIFFERENTES ZONES



ZONE ① : Frottement de glissement
surface coupée / face de dépuille

ZONE ② : Frottement de glissement
copeau / face de coupe

ZONE ③ : Séparation du métal en deux parties

ZONE ④ : Glissement plastique
formation du copeau

Dans les zones ② et ④ la température est la plus élevée.

Pour les outils carbures la dureté de l'outil diminue entre 800 et 900°, il faut donc maintenir la température des outils en dessous de ces valeurs lors de l'usinage.

Pour la pièce des températures élevées auront tendance à dilater la pièce et donc en refroidissant la pièce va se rétracter. Même s'il faut viser la cote moyenne de manière générale, il est préférable de viser la cote maxi (pour une cote extérieure) qui pourra être retouchée après refroidissement.

Pour refroidir l'outil et la pièce, on peut utiliser du lubrifiant (huile de coupe ou huile soluble). En plus de refroidir, le lubrifiant diminue le coefficient de frottement entre la pièce et l'outil ce qui facilite la coupe.

La lubrification doit être abondante pour évacuer les copeaux.

Pour certains métaux il est préférable d'éviter la lubrification (fonte, alu (alu de fonderie)...) à cause du fait qu'ils produisent des copeaux fragmentés qui forment une boue abrasive avec le lubrifiant.

V - LES 4 VARIABLES POUR AJUSTER LA QUANTITE DE COPEAU

- La vitesse de coupe V_c .
- L'angle d'inclinaison λ_s qui peut être positif, neutre ou négatif.
- La profondeur de passe a .
- L'avance f_n .

V.1- Influence de la vitesse de coupe V_c

La vitesse de coupe est en fonction de la matière à usiner et est donnée par le fabricant pour obtenir une coupe optimale, à savoir qui enlève le maximum de matière pour une usure minimale de l'outil.

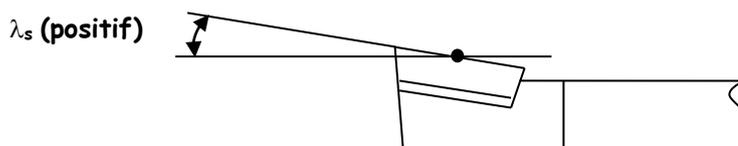
Une vitesse de coupe trop faible entraîne un copeau arraché.

Une vitesse de coupe trop élevée entraîne un copeau adhérent.

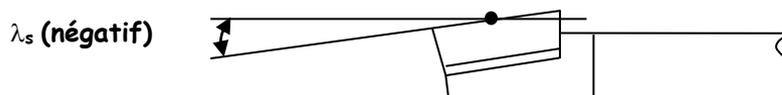
Une vitesse de coupe correcte entraîne un copeau continu.

V.2- Influence de l'angle d'inclinaison λ_s

L'angle d'inclinaison λ_s positif est utilisé pour des matériaux « mous » comme l'aluminium, il permet d'obtenir un copeau en forme de spirale large.



L'angle d'inclinaison λ_s négatif est utilisé pour des matériaux « durs » ou difficile à usiner, il permet d'obtenir un copeau en forme de spirale serrée. Il faut une machine puissante et rigide pour assurer un bon usinage.



L'angle d'inclinaison λ_s neutre a les avantages et les inconvénients des 2 précédents mais fait office de compromis qui permet d'obtenir un copeau continu ni très large ni très serré.



V.3- Influence de la profondeur de passe a

Une profondeur de passe trop grande entraîne un copeau arraché. Le copeau mal formé engendre un mauvais état de surface et abîme l'outil.

Une profondeur de passe trop petite ne permet pas d'obtenir un copeau, ce sera plutôt une formation de poussière qui donnera un mauvais état de surface.

Une profondeur de passe correcte entraîne un copeau continu comme voulu.

V.4- Influence de l'avance f_n

L'avance affecte la formation du copeau à peu près de la même façon que la profondeur de passe.

Augmenter l'avance revient à augmenter la profondeur de passe car on épaissit le copeau dans les 2 cas.

L'avance est plutôt liée à l'état de surface de la pièce, il est donc préférable de jouer sur la profondeur de passe pour obtenir une bonne formation de copeau.

VI - CONCLUSION

Les variables de coupe doivent être optimales pour obtenir un copeau continu, un bon état de surface tout en préservant l'outil.



TD no. 01 : Formation du copeau

Exercice 1 :

Nommer les parties manquantes sur la figure 1 (formation du copeau en coupe orthogonale) :

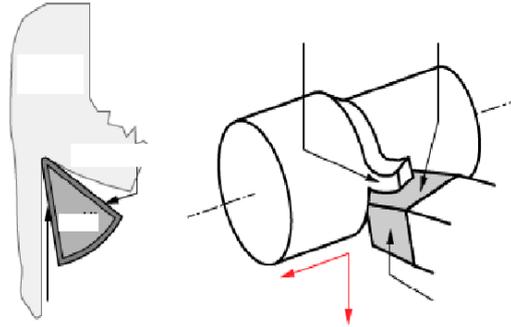


Figure 1- Formation du copeau en coupe orthogonale.

Exercice 2 :

Expliquer ce qui se passe dans les quatre zones (1, 2, 3, 4) de la figure 2.

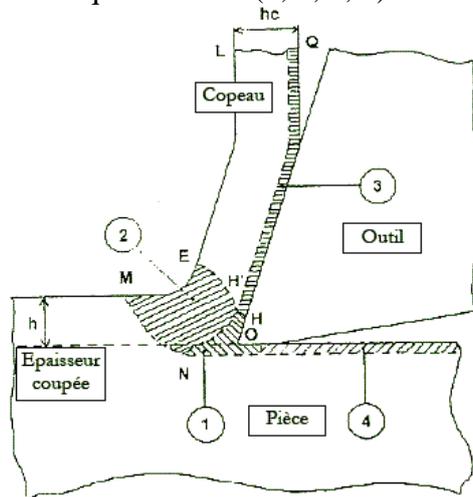


Figure 2- Zones de cisaillement.

Exercice 3 :

L'épaisseur du copeau indéformé (h_0) est plus petite que l'épaisseur du copeau (h_1). Le rapport « r » est dit -rapport de coupe- (et le rapport $1/r = h_1/h_0$ est dit aussi « recalage » dans l'argot de l'atelier).

La mesure de r , permet de connaître la position du plan de cisaillement.

Le plan de cisaillement influence les forces de coupe (pour Φ petit les forces de coupe sont grandes) et la vitesse de glissement sur la face de coupe (V_f).

, (figure. 3)

1- Trouver la relation entre h_0 et h_1 en utilisant V_g et V_c .

2- Exprimer le rapport (r) en fonction de h_0 et h_1 ; et aussi en fonction de V_c et V_g .

3- Exprimer l'angle de cisaillement Φ en fonction de l'angle de coupe (γ) et du rapport (r).

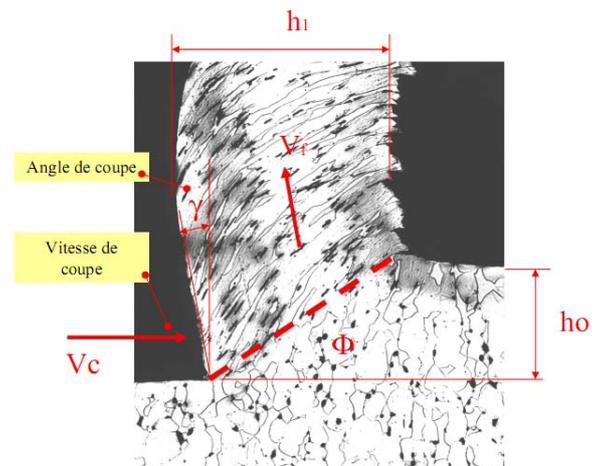


Figure 3 – Relation entre h_0 et h_1 .

Chapitre II : Géométrie des outils de coupe

1) Généralités

2) Définition des faces de l'outil

3) Définition des plans de l'outil

4) Repérage des plans de l'outil

5) Définition des angles caractéristiques de l'outil

5.1-les angles d'arête de l'outil

5.2-les angles de face de l'outil

5.3-Exemples d'outils avec γ_0 et λ_s qui changent

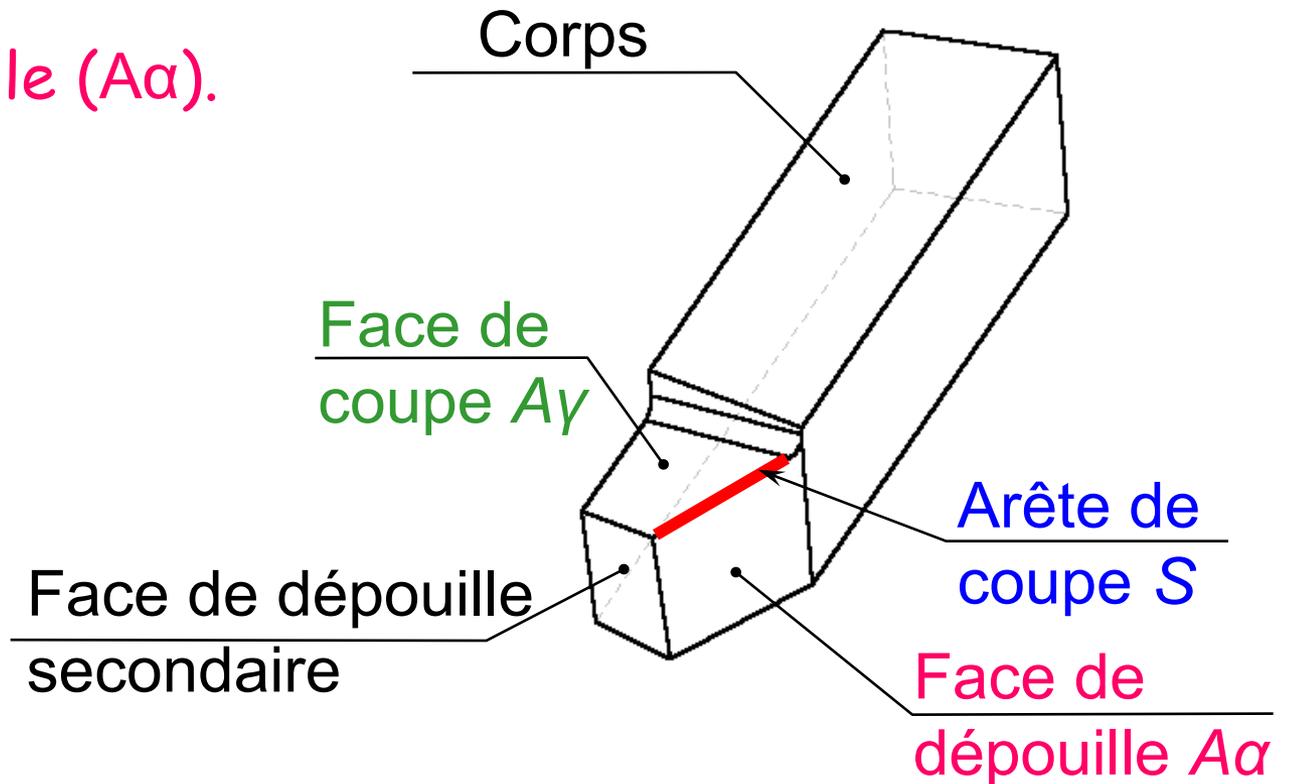
5.4-Autres outils de coupe

6) Méthode de travail

1) Généralités

La partie active est constituée:

- d'une arête de coupe intersection de
- la face de coupe ($A\gamma$) et de
- la face de dépouille ($A\alpha$).



2) Définition des faces de l'outil

$A\gamma$: face de coupe (γ : "gamma")

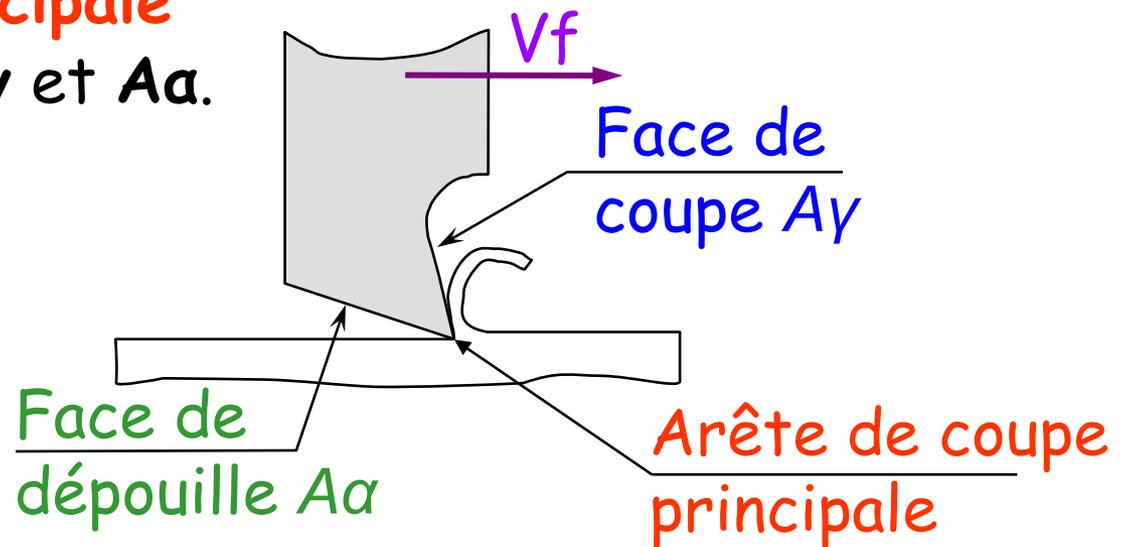
⇒ Face sur laquelle glisse le copeau.

$A\alpha$: face de dépouille (α : "alpha")

⇒ Face devant laquelle passe la surface qui vient d'être usinée.

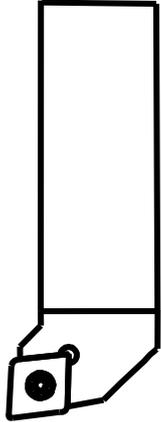
S : arête de coupe principale

⇒ intersection entre $A\gamma$ et $A\alpha$.

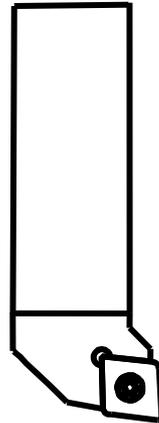


2) Définition des faces de l'outil

Le sens de l'outil est défini par la position de l'arête de coupe (S). En considérant l'outil **tenu en main** verticalement et le bec en bas



Outil à plaquette carbure, à gauche (L)



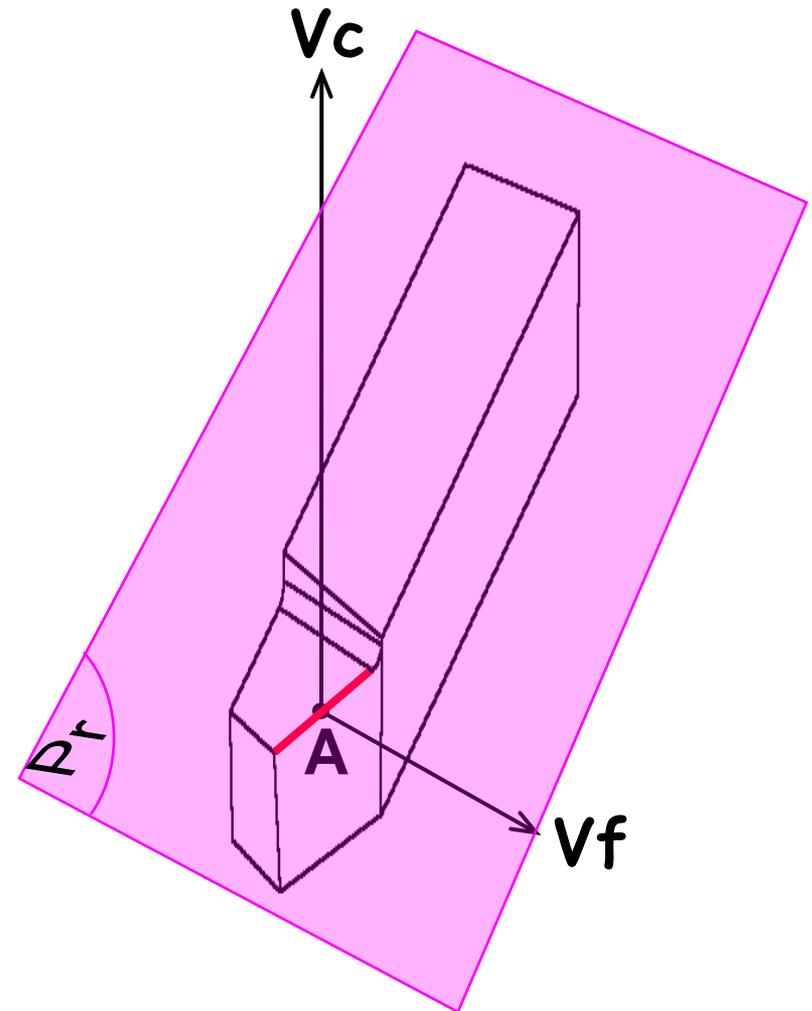
Outil à plaquette carbure, à droite (R)



Outil à plaquette carbure, neutre (N)

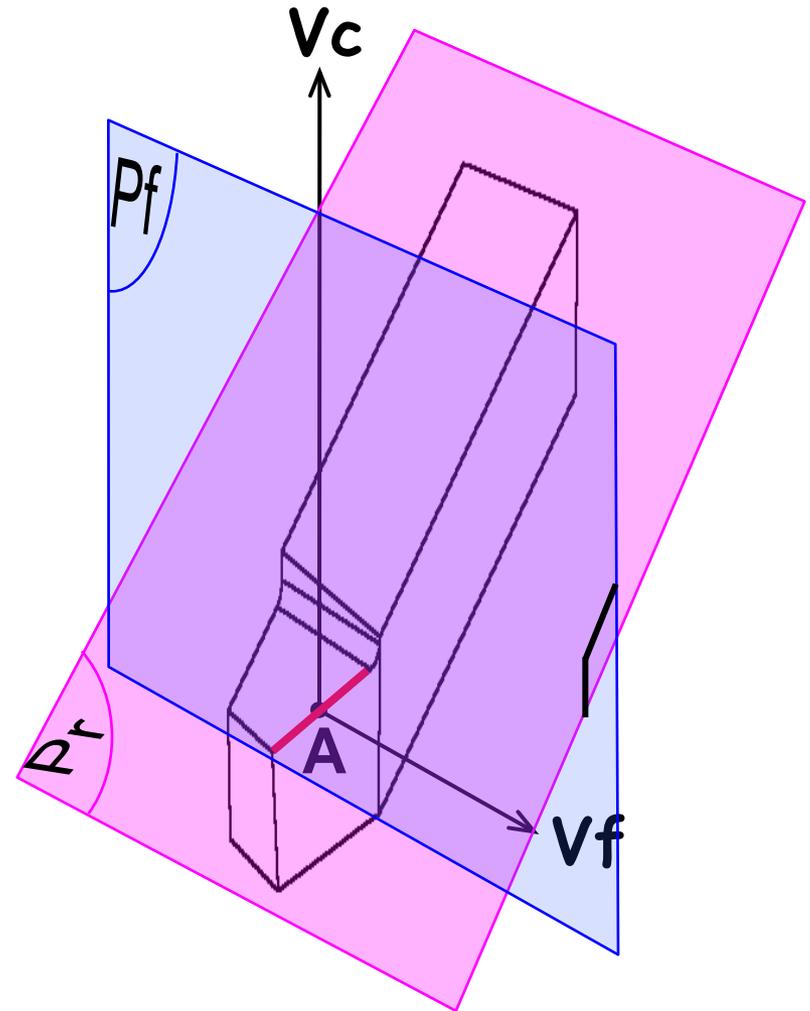
3) Définition des plans de l'outil

- P_r = Plan de référence
⇒ C'est un plan perpendiculaire au vecteur V_c (vitesse de coupe) et passant par le point considéré A de l'arête de coupe. Pour un outil rotatif, P_r passe aussi par l'axe de rotation.



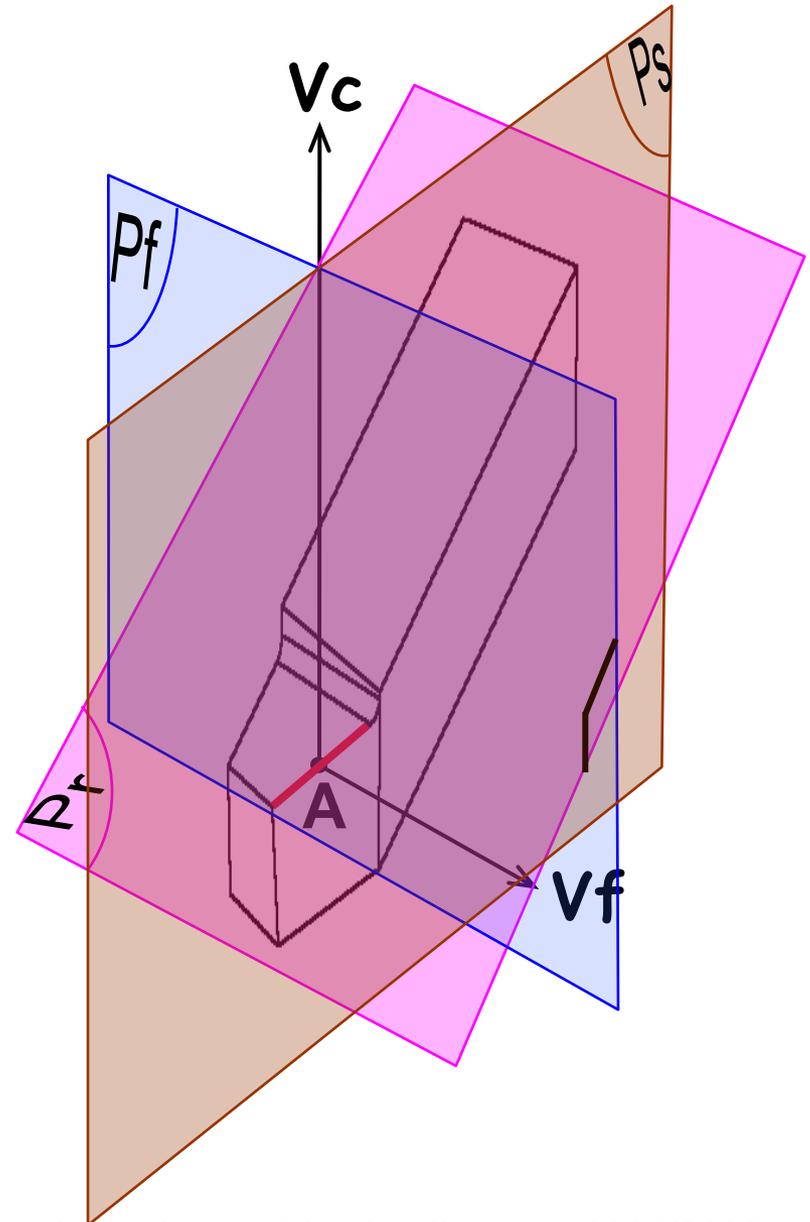
3) Définition des plans de l'outil

- P_f = Plan de travail conventionnel
- ⇒ C est le plan perpendiculaire au plan de référence P_r , qui contient le vecteur V_f (vitesse d'avance) et passant par le point considéré A de l'arête de coupe.



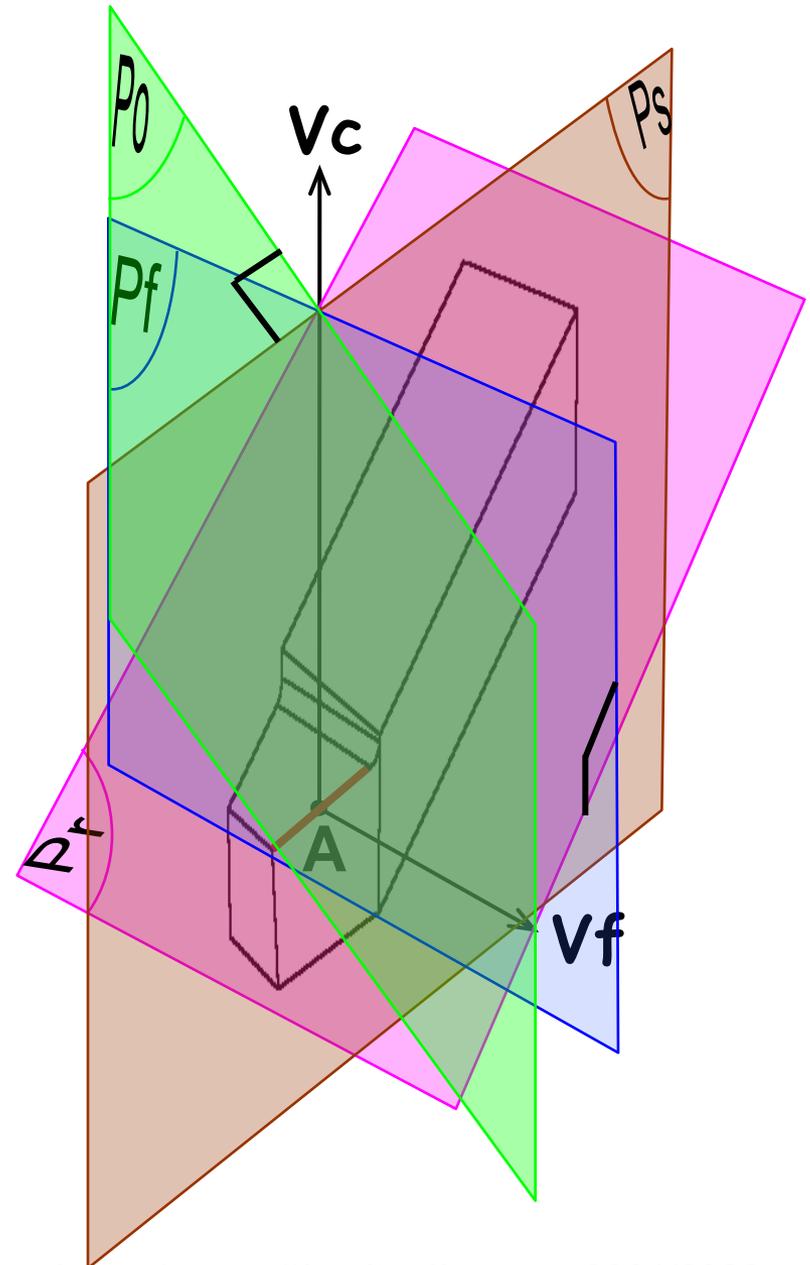
3) Définition des plans de l'outil

- P_s = Plan d'arête
⇒ C' est le plan perpendiculaire au plan de référence P_r , qui contient la tangente à l'arête de coupe, au point considéré A .

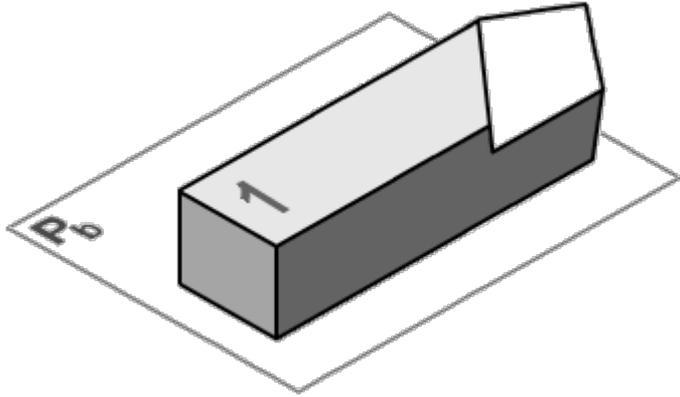


3) Définition des plans de l'outil

- P_o = Plan orthogonal
⇒ C' est le plan perpendiculaire au plan de référence P_r et au plan d'arête P_s , passant par le point A considéré de l'arête de coupe.



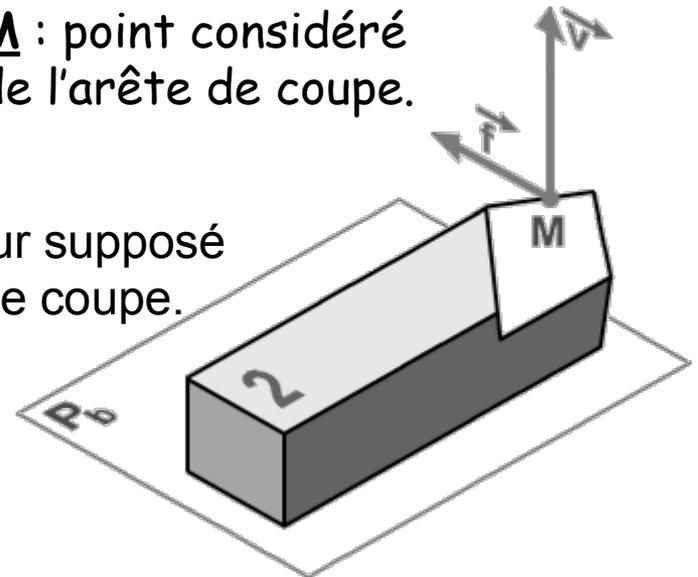
4) Repérage des plans de l'outil



P_b : plan de base,
surface d'appui de
l'outil

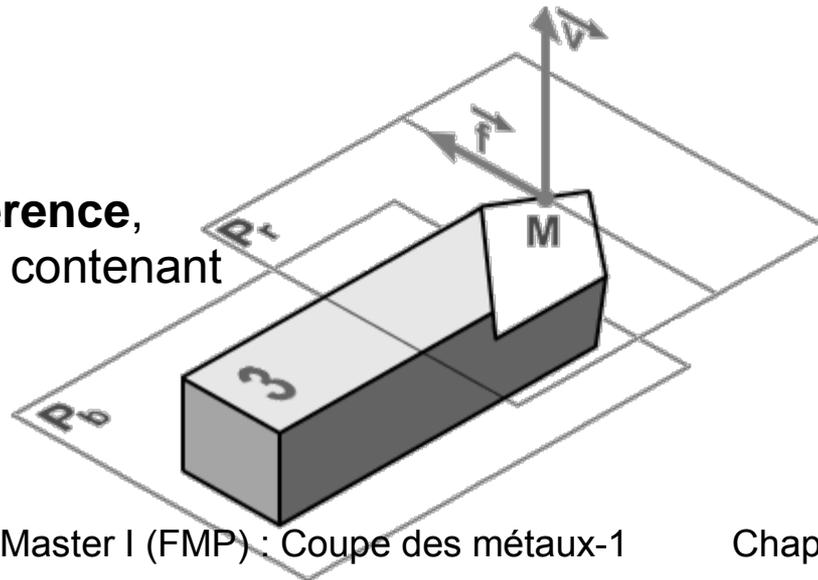
M : point considéré
de l'arête de coupe.

V : Vecteur supposé
du sens de coupe.

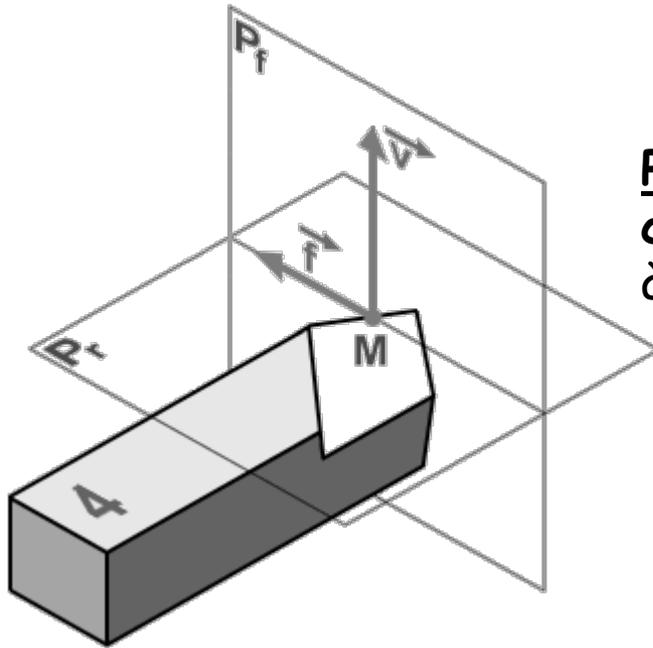


f : Vecteur supposé
du sens d'avance.

P_r : plan de référence,
parallèle à P_b et contenant
M et f.

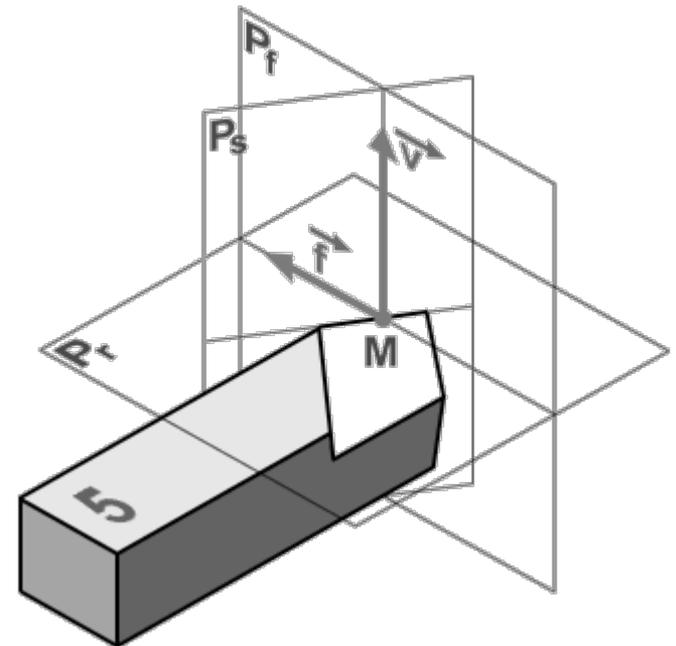


4) Repérage des plans de l'outil



Pf : plan de travail conventionnel, perpendiculaire à P_r et contenant M , V et f

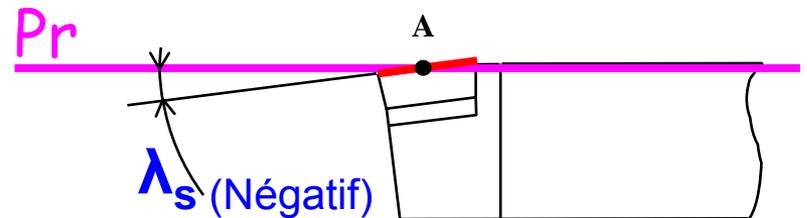
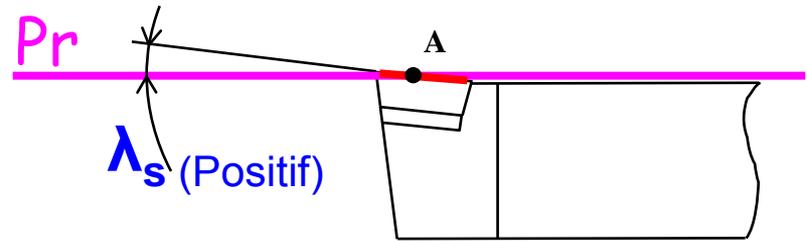
Ps : plan d'arête de l'outil, perpendiculaire à P_r et tangent à l'arête de coupe en M



5) Définition des angles caractéristiques de l'outil

- 5.1-les angles d'arête de l'outil

λ_s = Angle d'inclinaison
d'arête "Lambda s":
Angle aigu mesuré dans P_s ,
compris entre P_r et la
tangente à l'arête, au point
A. Il peut être positif ou
négatif.

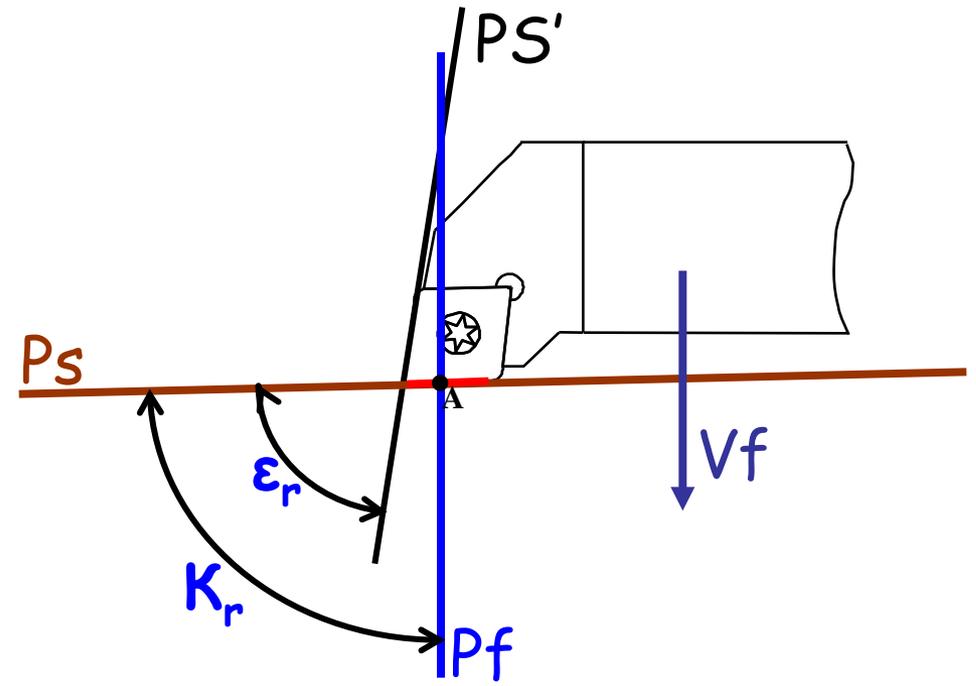


5) Définition des angles caractéristiques de l'outil

- 5.1-les angles d'arête de l'outil

K_r = Angle de direction
d'arête " **κ_r** " :
angle aigu mesuré dans
 P_r , compris entre **P_f** et
 P_s .

ϵ_r = Angle de pointe
" **ϵ_r** " :
Angle mesuré dans **P_r**
entre l'arête de coupe
principale **S** et l'arête
de coupe secondaire **S'** .



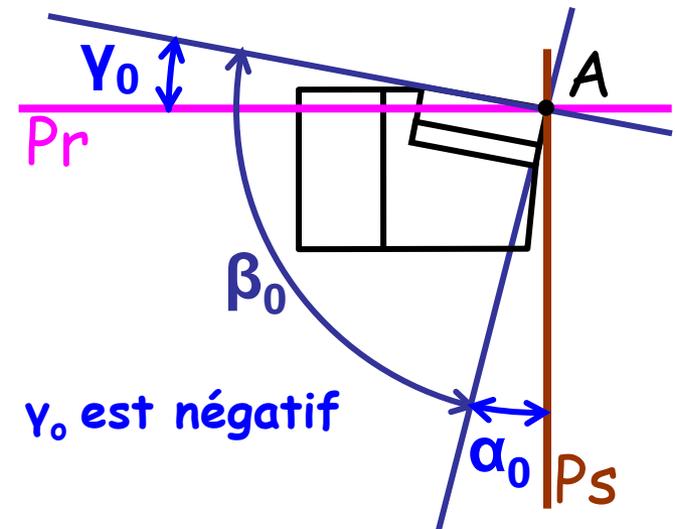
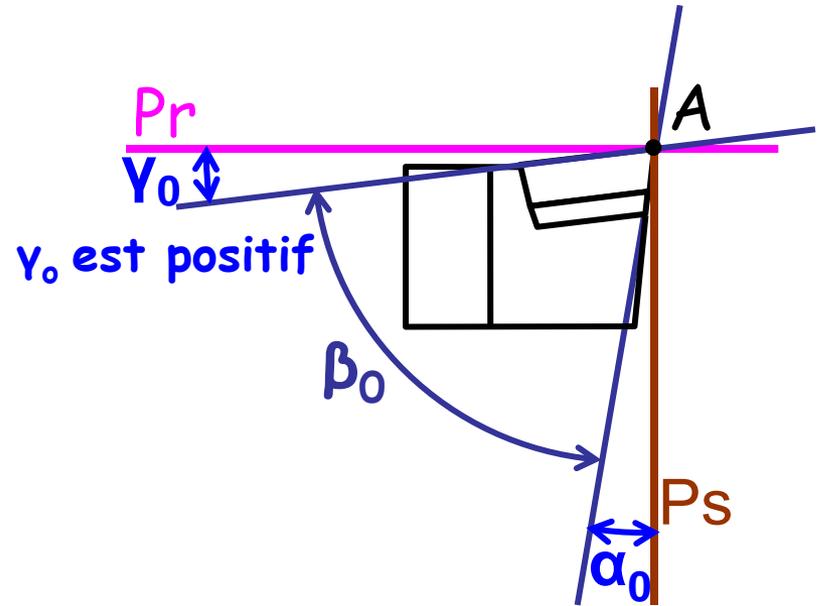
5) Définition des angles caractéristiques de l'outil

- 5.2-les angles de face de l'outil

α_0 = Angle de dépouille orthogonal (alpha O):
Angle aigu mesuré dans P_0 ,
compris entre P_s et $A\alpha$.

β_0 = Angle de taillant orthogonal (béta O):
Angle mesuré dans P_0 ,
compris entre $A\alpha$ et $A\gamma$.

γ_0 = Angle de coupe orthogonal (gamma O) :
Angle aigu mesuré dans P_0 ,
compris entre P_r et $A\gamma$.



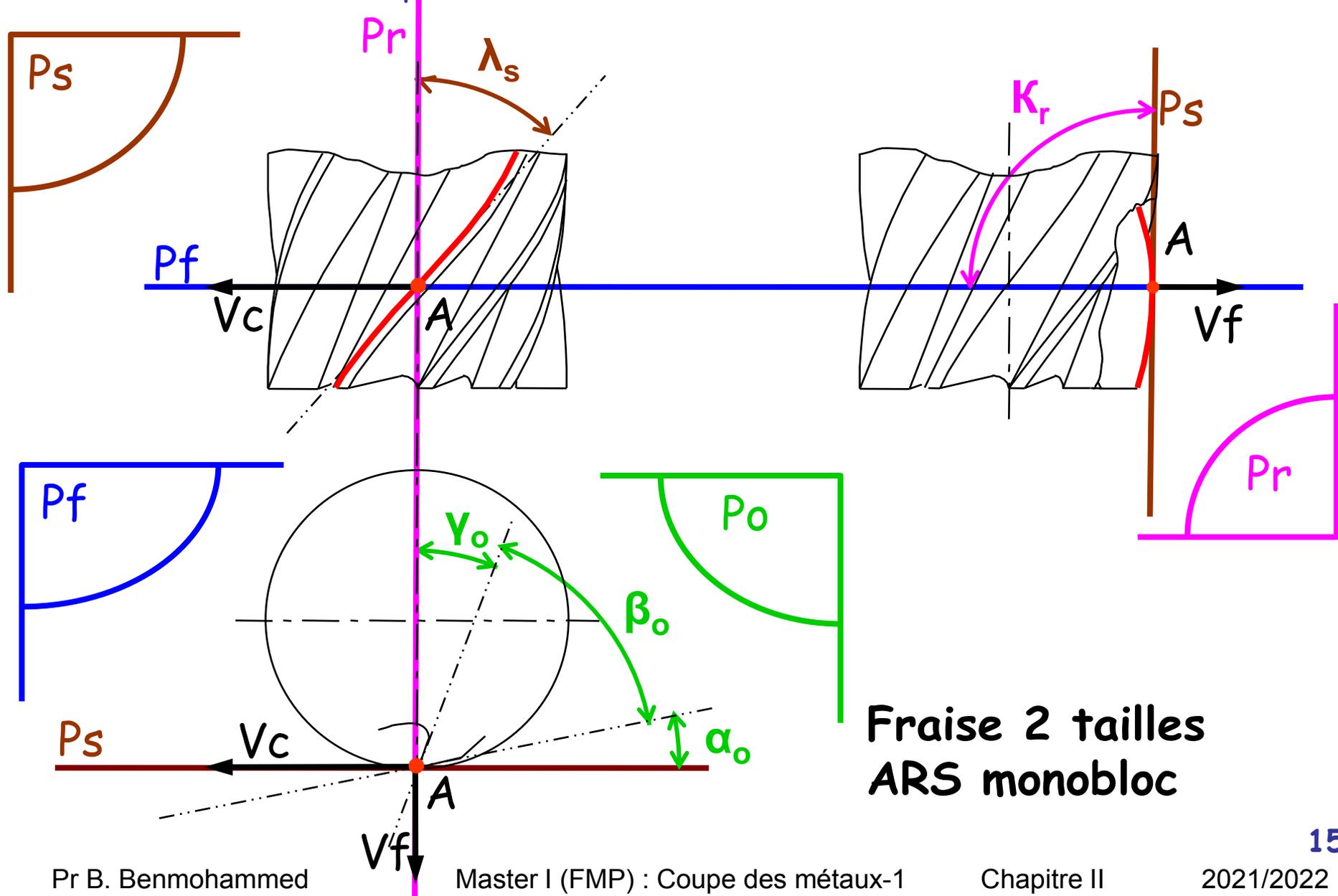
5) Définition des angles caractéristiques de l'outil

- 5.3-Exemples d'outils avec γ_0 et λ_s qui changent

	$\gamma = 6^\circ$ (Négatif)	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = -6^\circ$ (Positif)
$\lambda = -7^\circ$ (Positif)			
$\lambda = 0^\circ$			
$\lambda = 7^\circ$ (Négatif)			

5) Définition des angles caractéristiques de l'outil

- 5.4-Autres outils de coupe

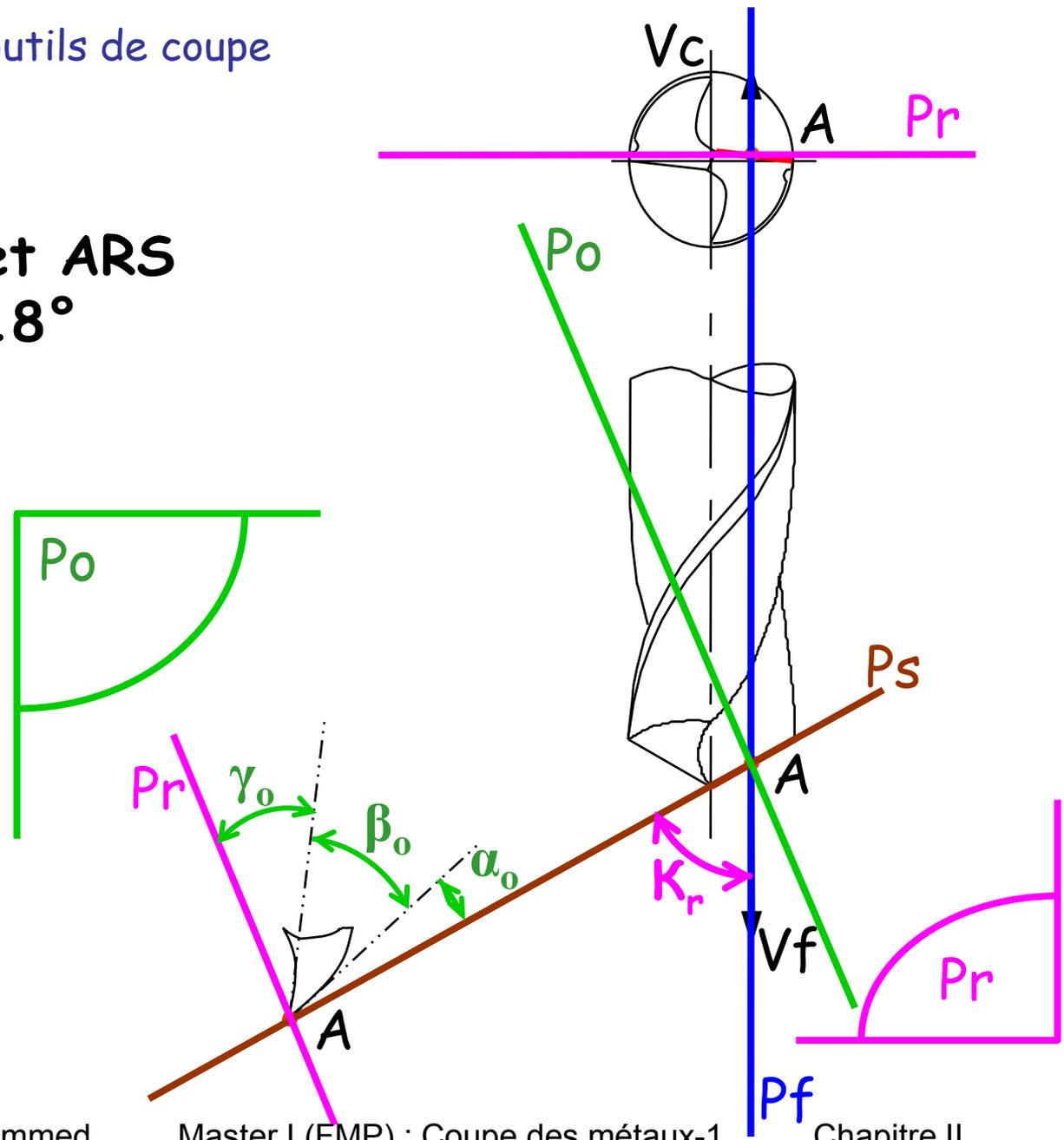


**Fraise 2 tailles
ARS monobloc**

5) Définition des angles caractéristiques de l'outil

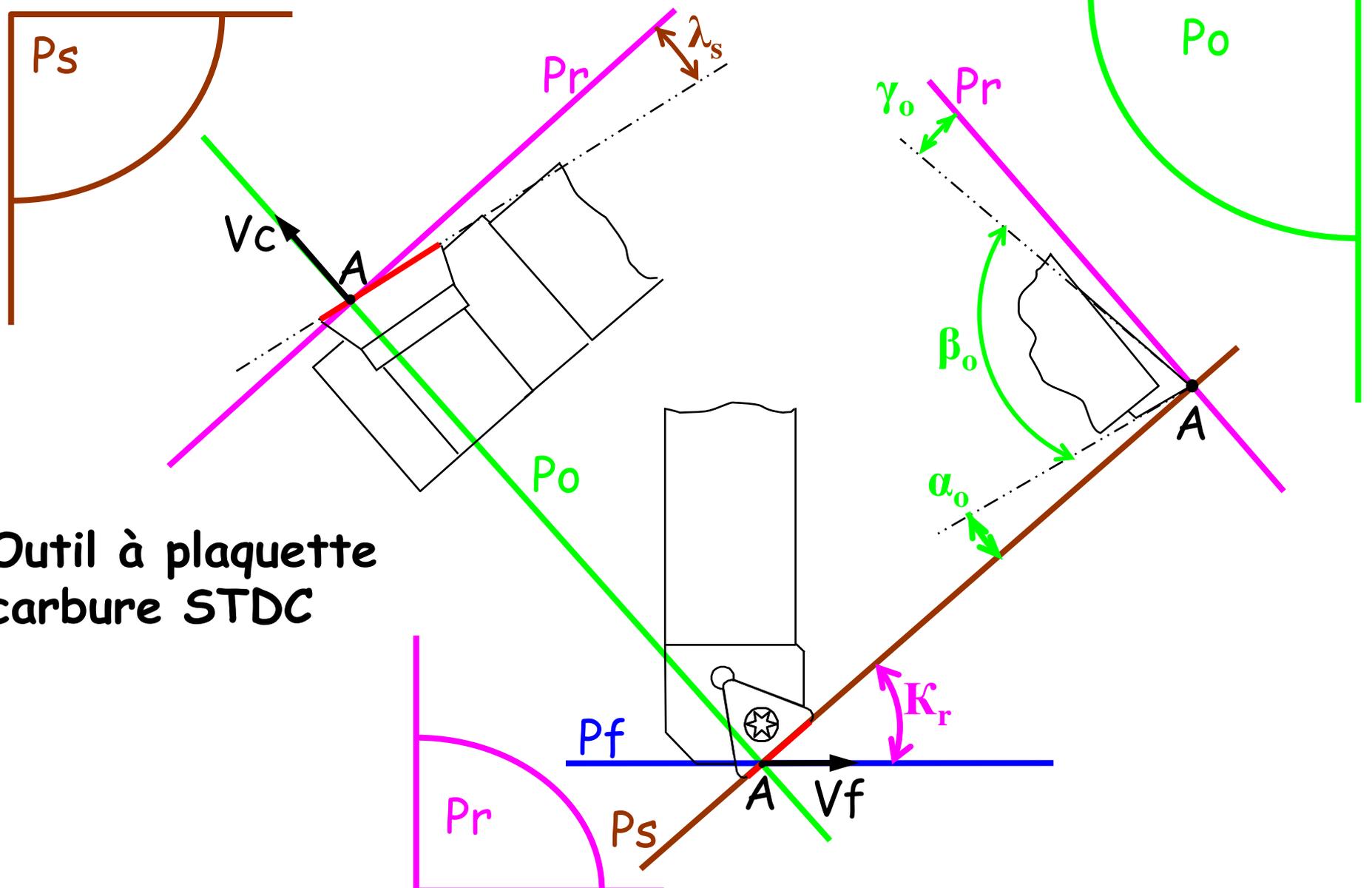
- 5.4-Autres outils de coupe

Foret ARS
à 118°



5) Définition des angles caractéristiques de l'outil

- 5.4-Autres outils de coupe



Outil à plaquette carbure STDC

6) Méthode de travail

CHRONOLOGIE DE LA RECHERCHE

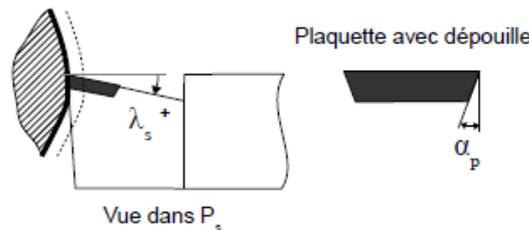
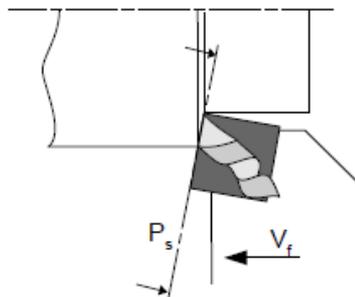
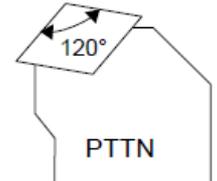
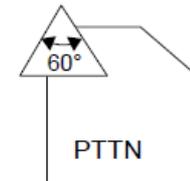
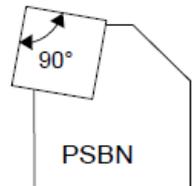
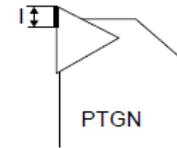
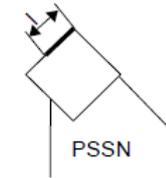
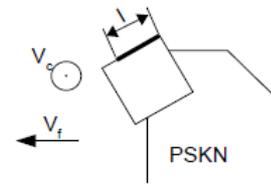
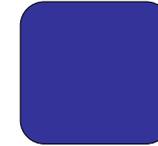
j Constantes de coupe	② Trièdre de référence	③ Angles d'arêtes	④ Angles des faces
<p>V_c : Vitesse de coupe.</p> <p>V_f : Vitesse d'avance.</p> <p>S : Arête tranchante principale</p> <p>A : Point considéré de l'arête tranchante.</p>	<p>P_r : Plan de référence $\perp V_c$ et passe par A.</p> <p>P_f : Plan de travail conventionnel $\perp P_r$, contient V_f et passe par A.</p> <p>P_s : Plan d'arête $\perp P_r$ et contient la tangente à S (ou contient S, si S est rectiligne) au point A.</p> <p>P_o : Plan orthogonal $\perp P_r$ et $\perp P_s$ passe par A.</p>	<p>λ_s : Angle d'inclinaison d'arête, mesuré dans P_s, entre P_r et S.</p> <p>κ_r : Angle de direction d'arête : angle aigu mesuré dans P_r, entre P_s et P_f.</p> <p>ϵ_r : Angle de pointe, mesuré dans P_r, entre S et S' (S' : arête secondaire)</p>	<p>α_o : Angle de dépouille orthogonal : angle aigu mesuré dans P_o, entre P_s et A_a.</p> <p>β_o : Angle de taillant orthogonal : angle mesuré dans P_o, entre A_a et A_y.</p> <p>γ_o : Angle de coupe orthogonal : angle aigu mesuré dans P_o, entre P_r et A_y.</p>

Angles caractéristiques des outils

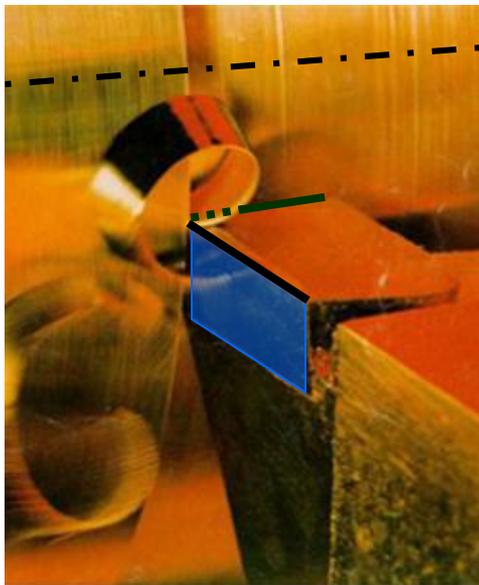
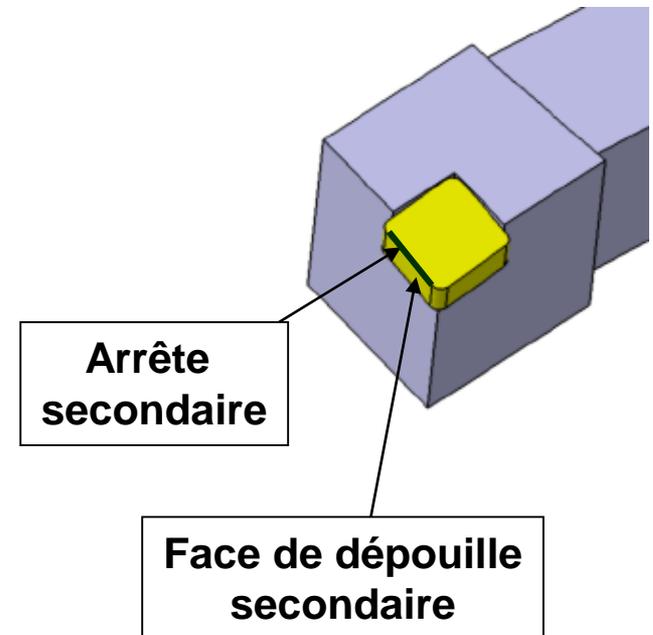
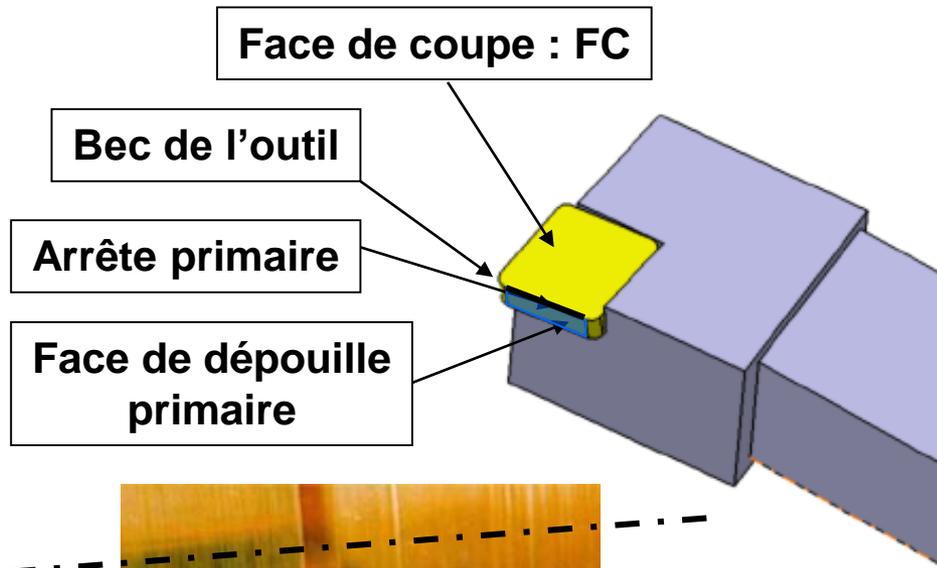
➤ **Pourquoi connaître ces angles ?**

➤ **Car ils influent sur :**

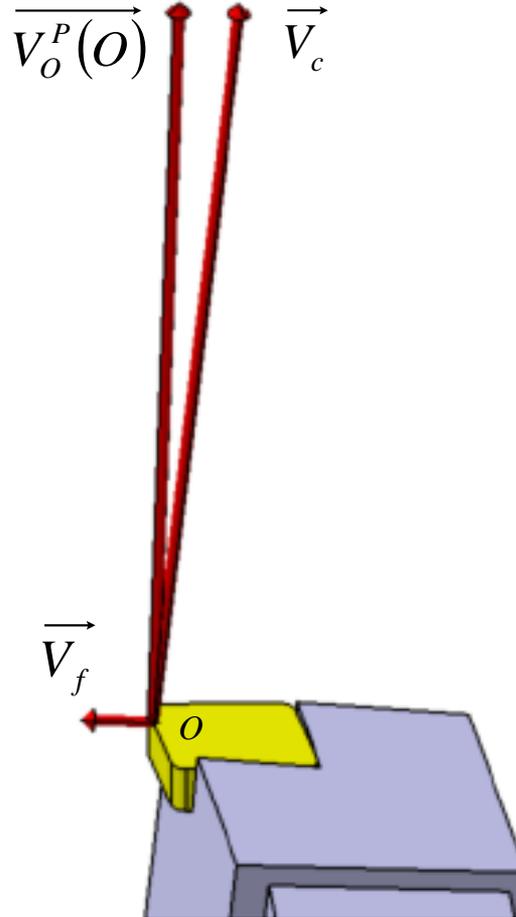
- ❑ la longueur d'arête en travail
- ❑ l'entrée en matière en début de passe
- ❑ la sortie de passe
- ❑ la fragilité en pointe de l'outil
- ❑ la direction de dégagement du copeau
- ❑ la robustesse et la réversibilité de la plaquette



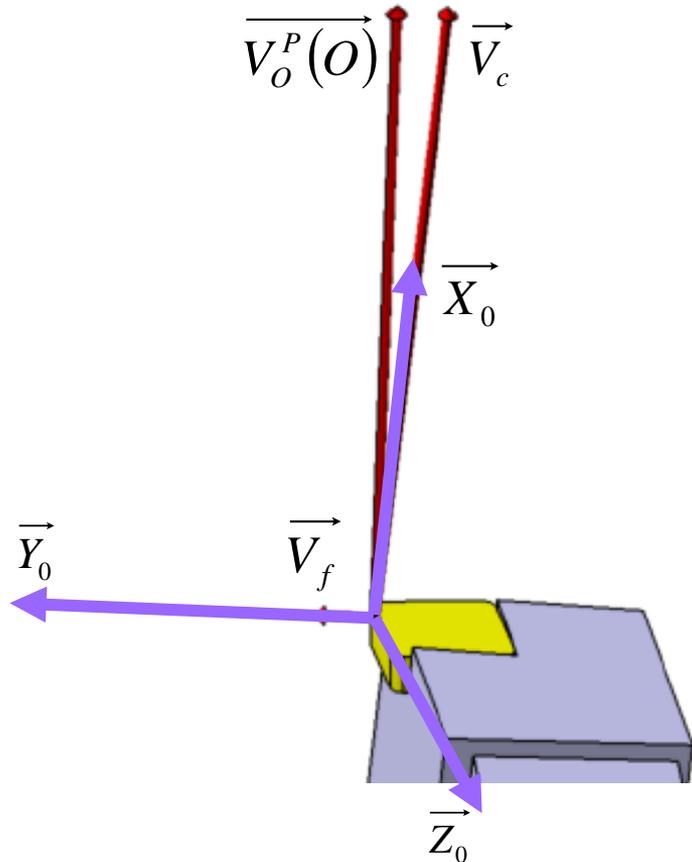
Angles caractéristiques des outils



Angles caractéristiques des outils



Angles caractéristiques des outils

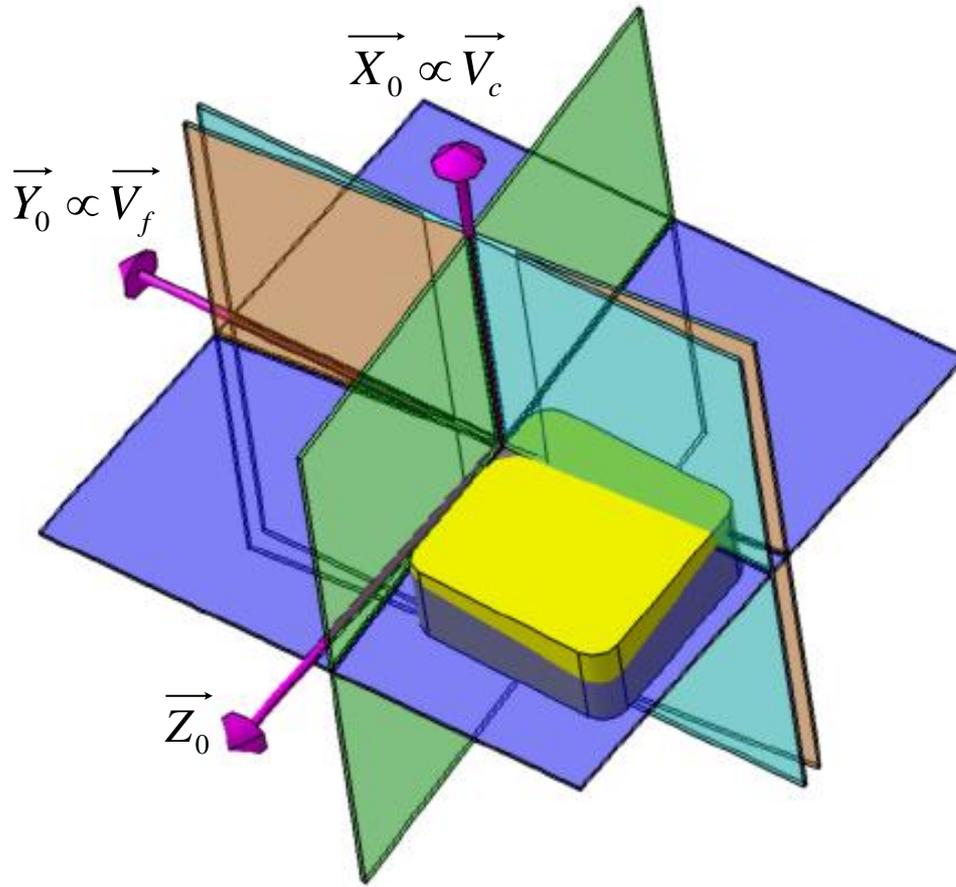


$$\vec{X}_0 = \frac{\vec{V}_c}{\|\vec{V}_c\|}$$

$$\vec{Y}_0 = \frac{\vec{V}_f}{\|\vec{V}_f\|}$$

$(O, \vec{X}_0, \vec{Y}_0, \vec{Z}_0)$ repère orthonormé direct

Angles caractéristiques des outils



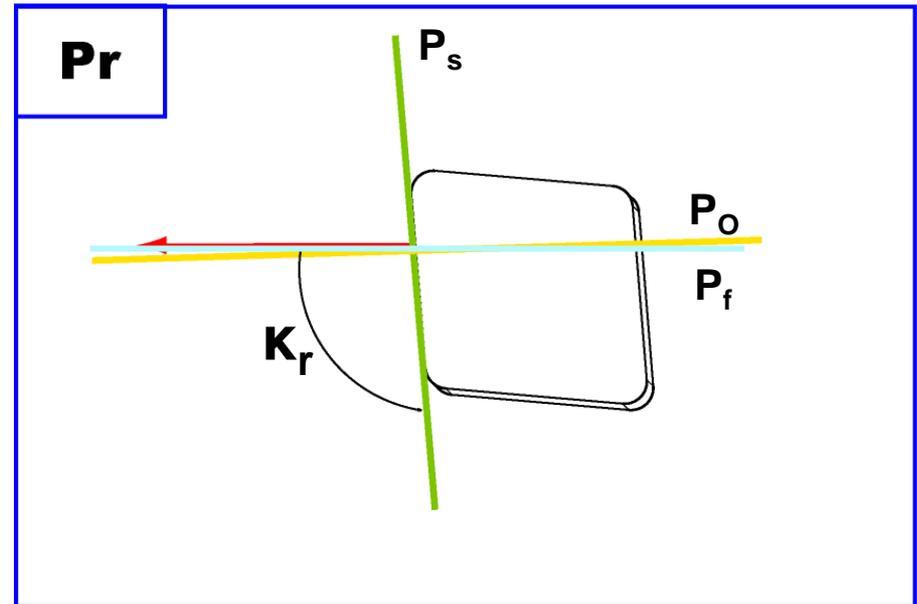
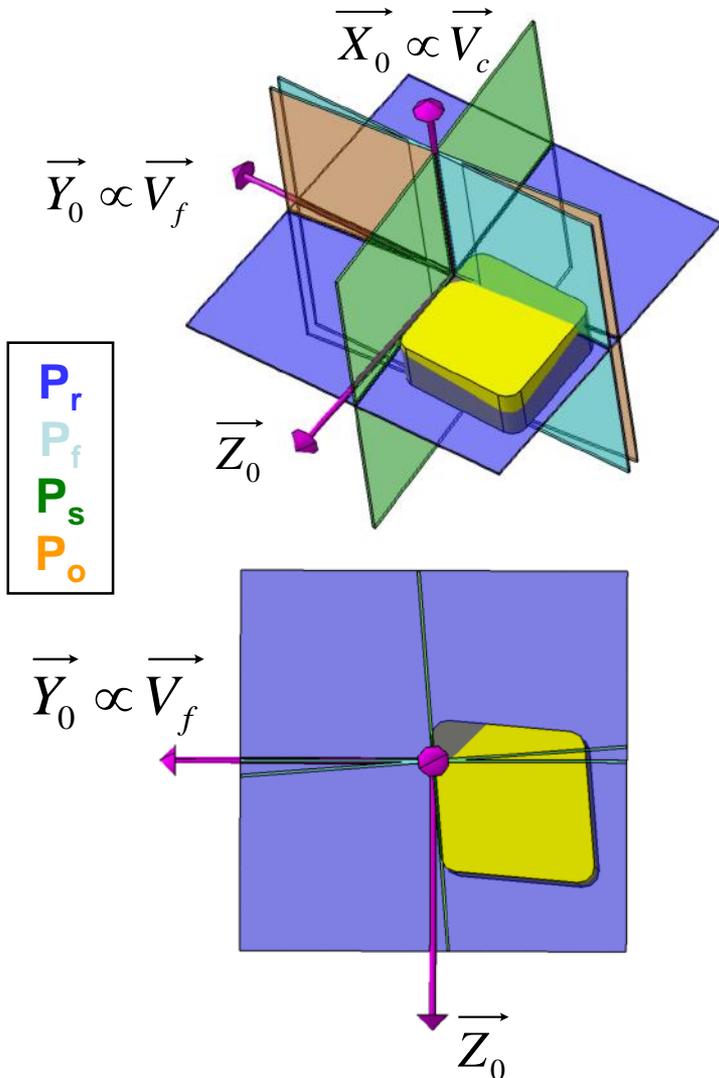
P_r : Plan de référence
 $P_r = (O, Y_0, Z_0)$; orthogonal à X_0

P_f : Plan de travail
 $P_f = (O, X_0, Y_0)$; orthogonal à Z_0

P_s : Plan d'arête
 P_s orthogonal à P_r , contenant l'arête primaire et passant par O.

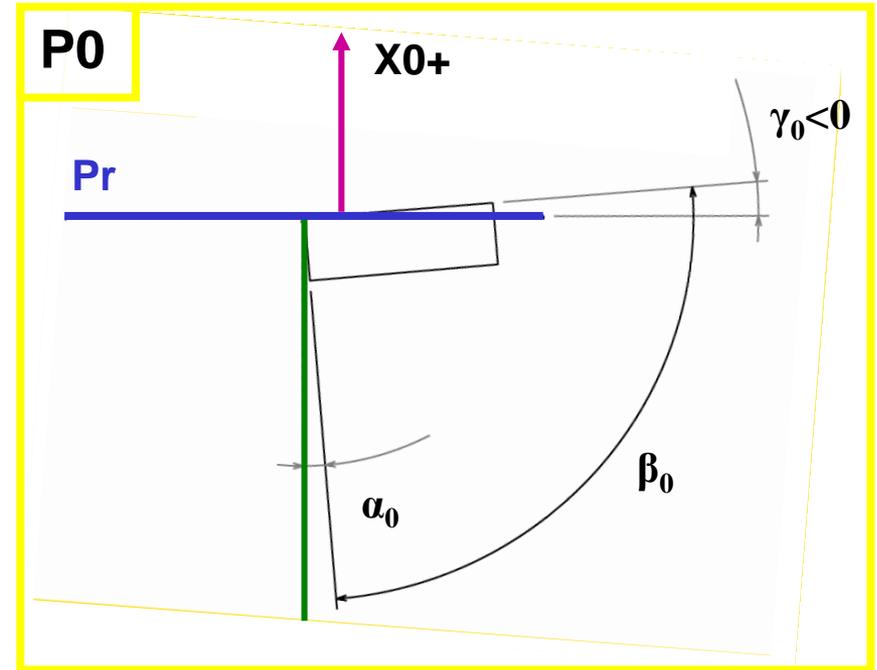
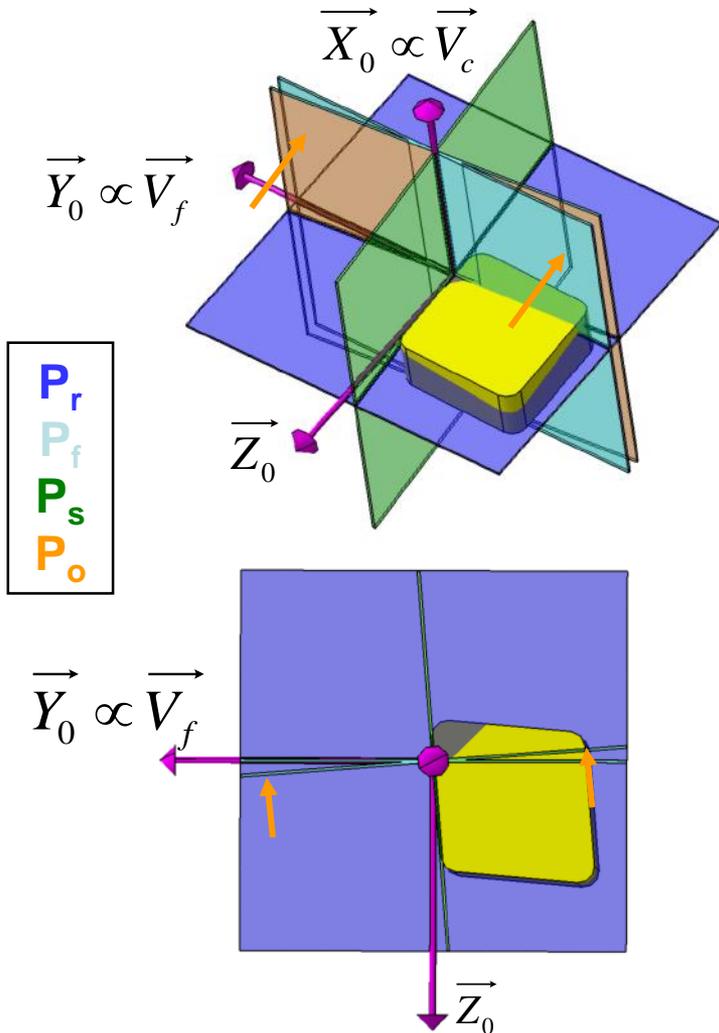
P_0 :
Plan orthogonal à P_r et P_s , passant par O

Angles caractéristiques des outils



Angle κ_r : direction d'arête, mesuré entre le plan de travail P_f et le plan d'arête P_s

Angles caractéristiques des outils



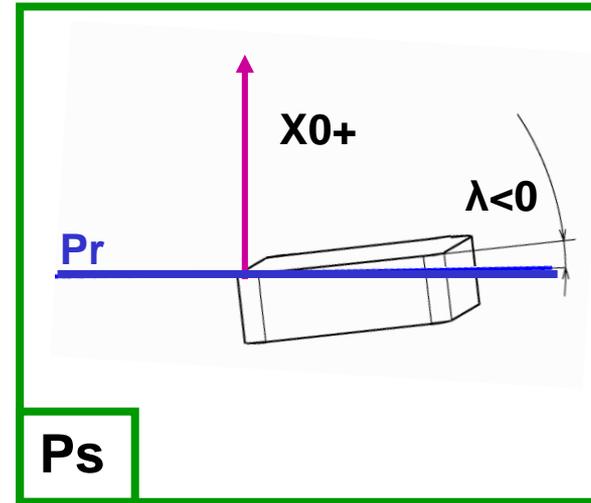
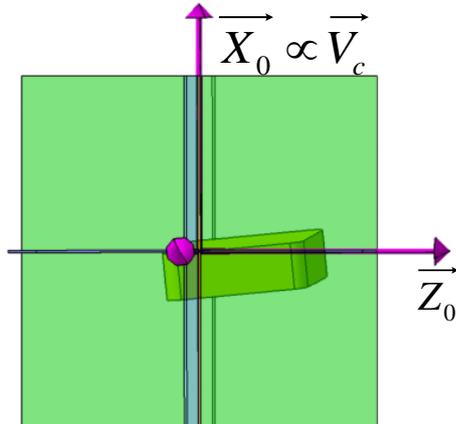
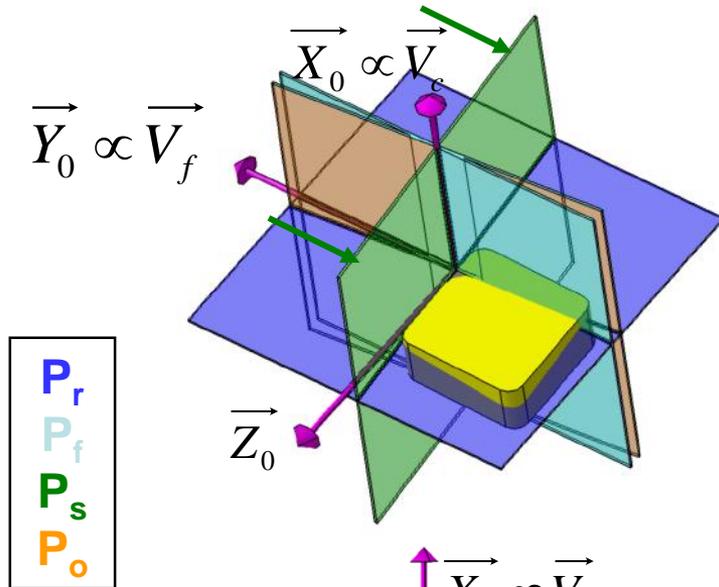
Angle γ_0 : angle de coupe (< 0 si FC vers X_{0+} et inversement)

Angle α_0 : angle de dépouille

Angle β_0 : angle de taillant

$$\alpha + \beta + \gamma = 90^\circ$$

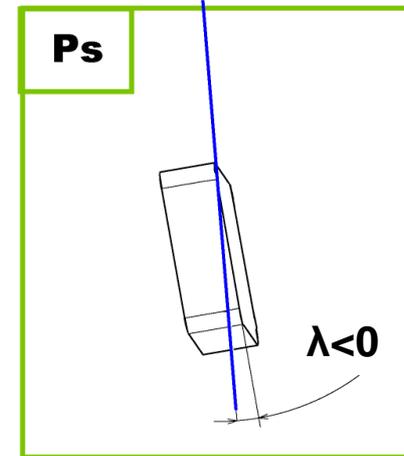
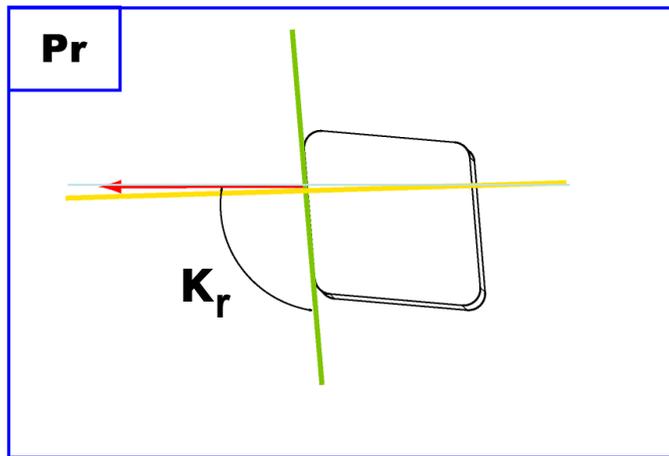
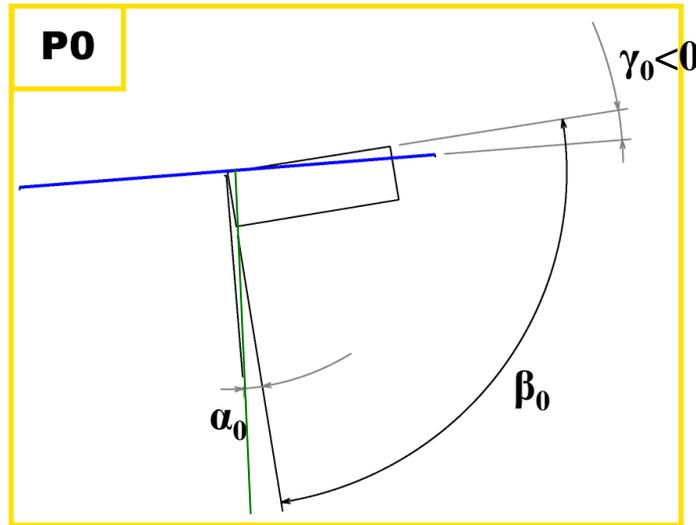
Angles caractéristiques des outils



Angle λ : inclinaison d'arête
(> 0 si F_c vers X_0^- et inversement)

Angles caractéristiques des outils

P_r
 P_f
 P_s
 P_o

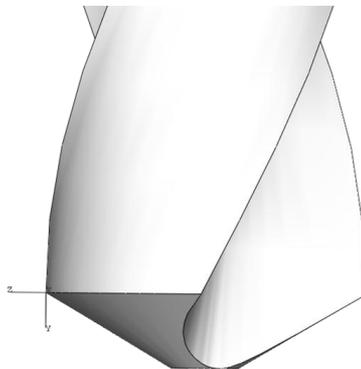
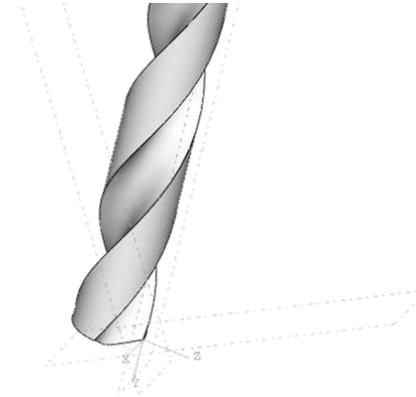
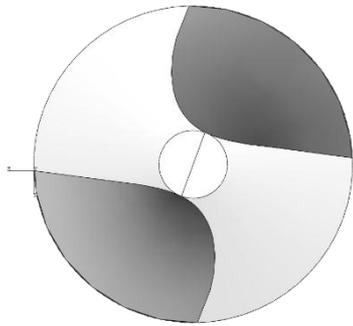


Angles caractéristiques des outils - Méthodologie

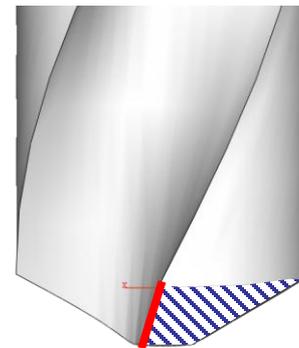
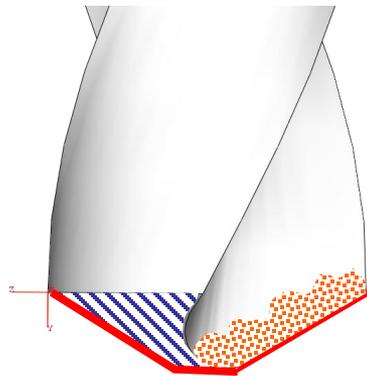
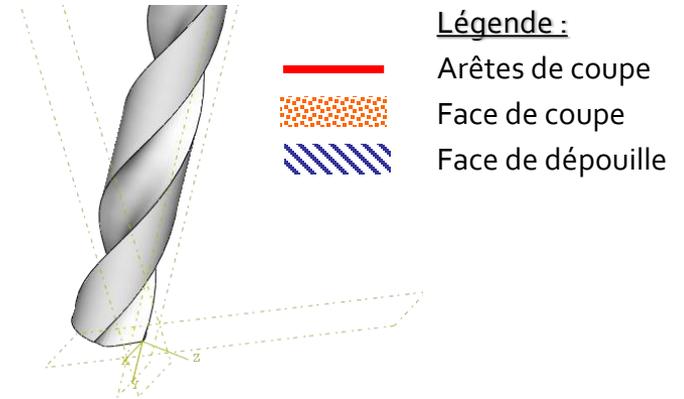
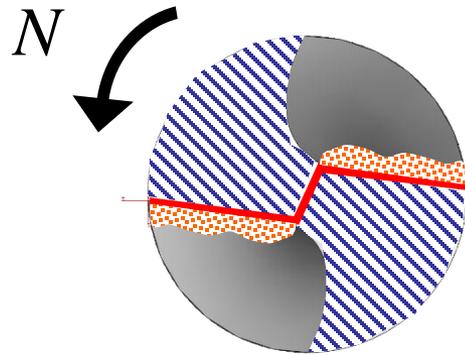
➤ **Détermination des angles de coupe outil en main**

- ❑ Spécifier la face de coupe, face de dépouille et arête de coupe
- ❑ Déterminer les vecteurs V_c et V_f en un point O de l'arête de coupe
- ❑ Associer un repère (O, X_0, Y_0, Z_0)
- ❑ Identifier les plans de l'outil (en main) P_r , P_f , P_o et P_s
 - { $P_r \perp V_c$ }
 - { $P_f \equiv (V_f, V_c)$ }
 - { P_s contient l'arête et $\perp P_r$ }
 - { $P_o \perp P_r$ et P_s }
- ❑ Projeter la plaquette dans ces plans pour identifier les angles de coupe
 - $P_r \rightarrow$ angle de direction d'arête (κ)
 - $P_o \rightarrow$ angle des face ($\alpha_o, \beta_o, \gamma_o$)
 - $P_s \rightarrow$ angle d'inclinaison d'arête (λ)

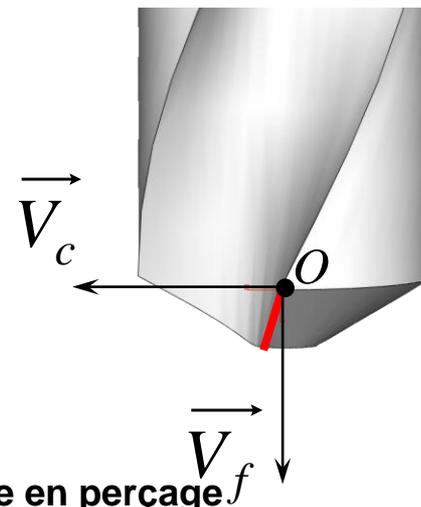
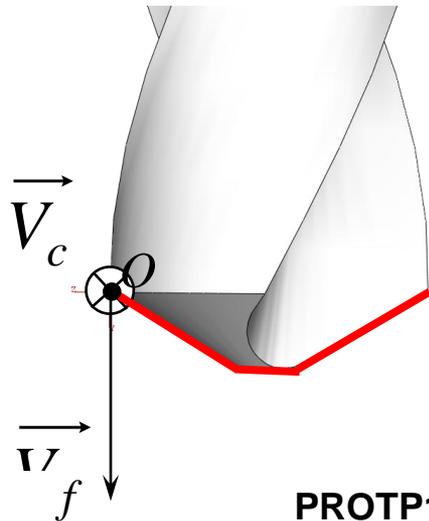
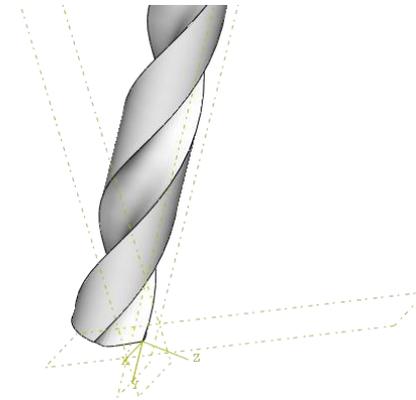
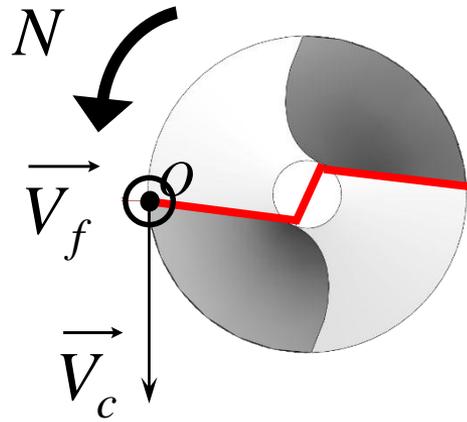
Exercice 2



Identification des arêtes de coupe et faces

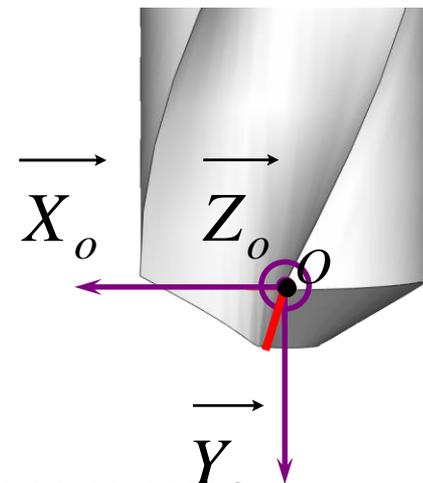
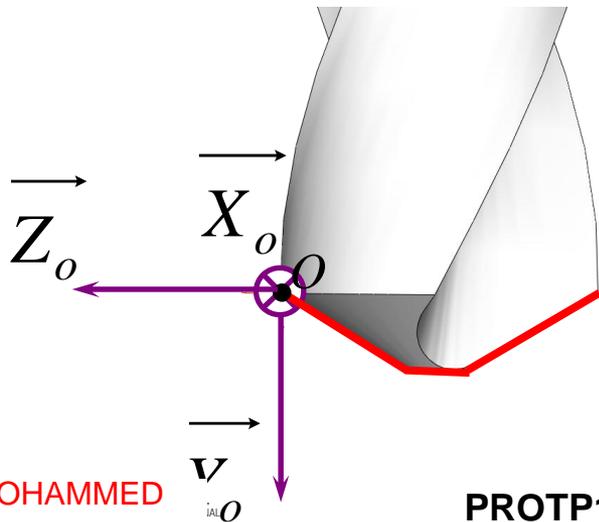
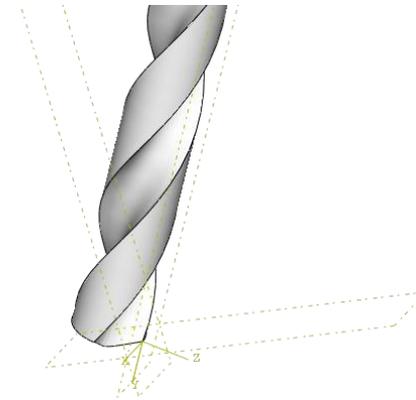
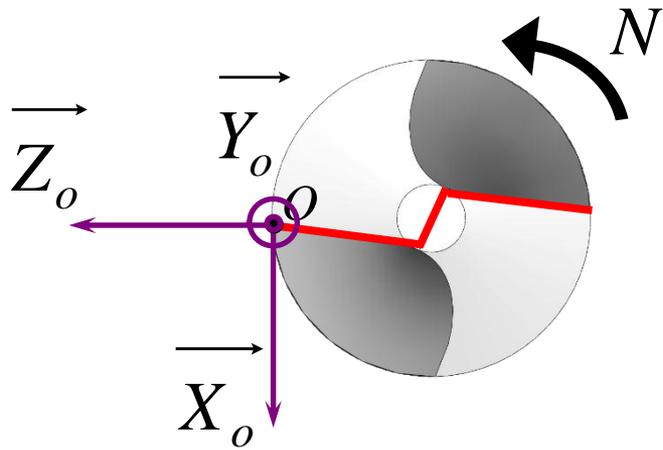


Détermination de V_c et V_f en O

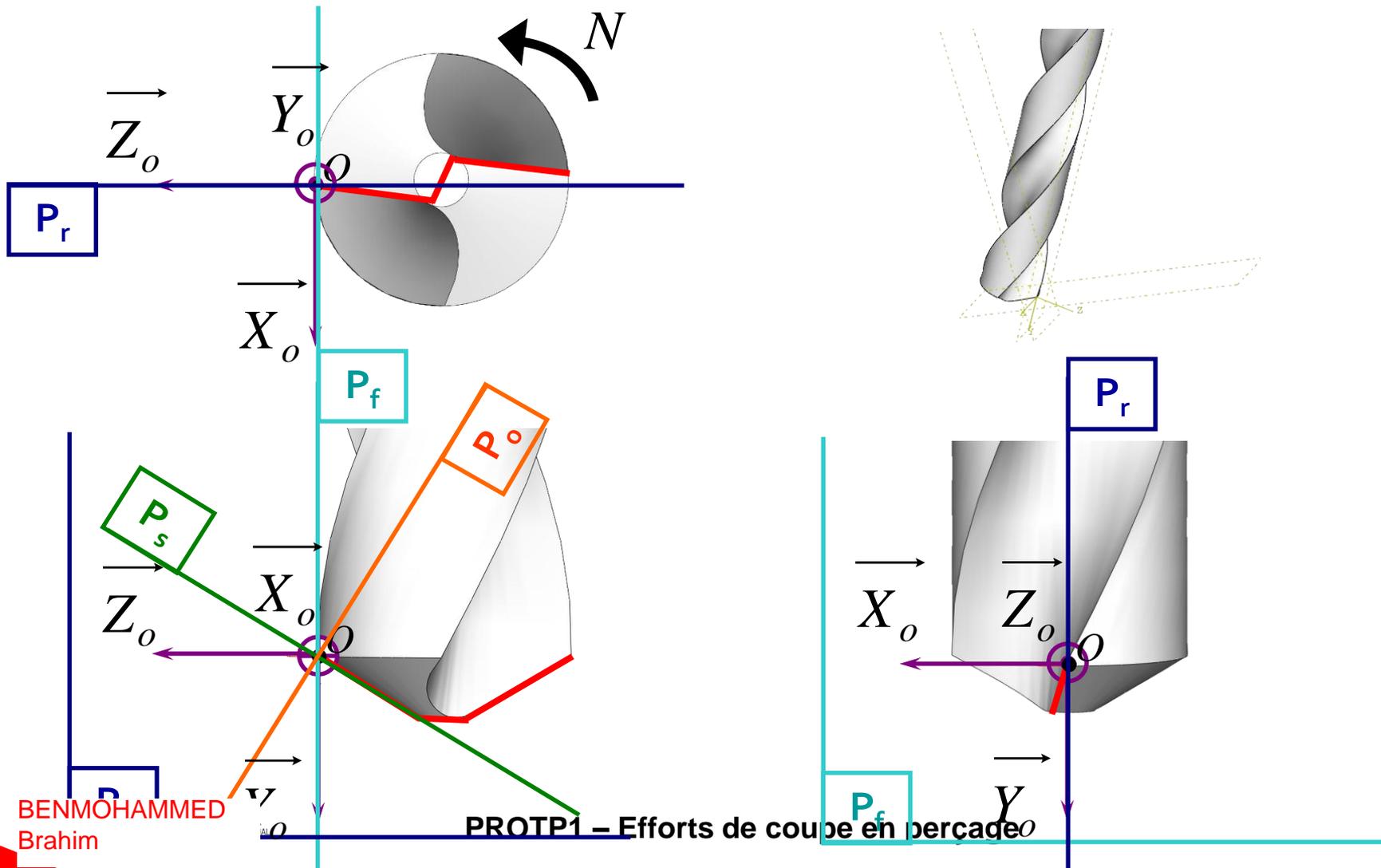


PROTP1 – Efforts de coupe en perçage f

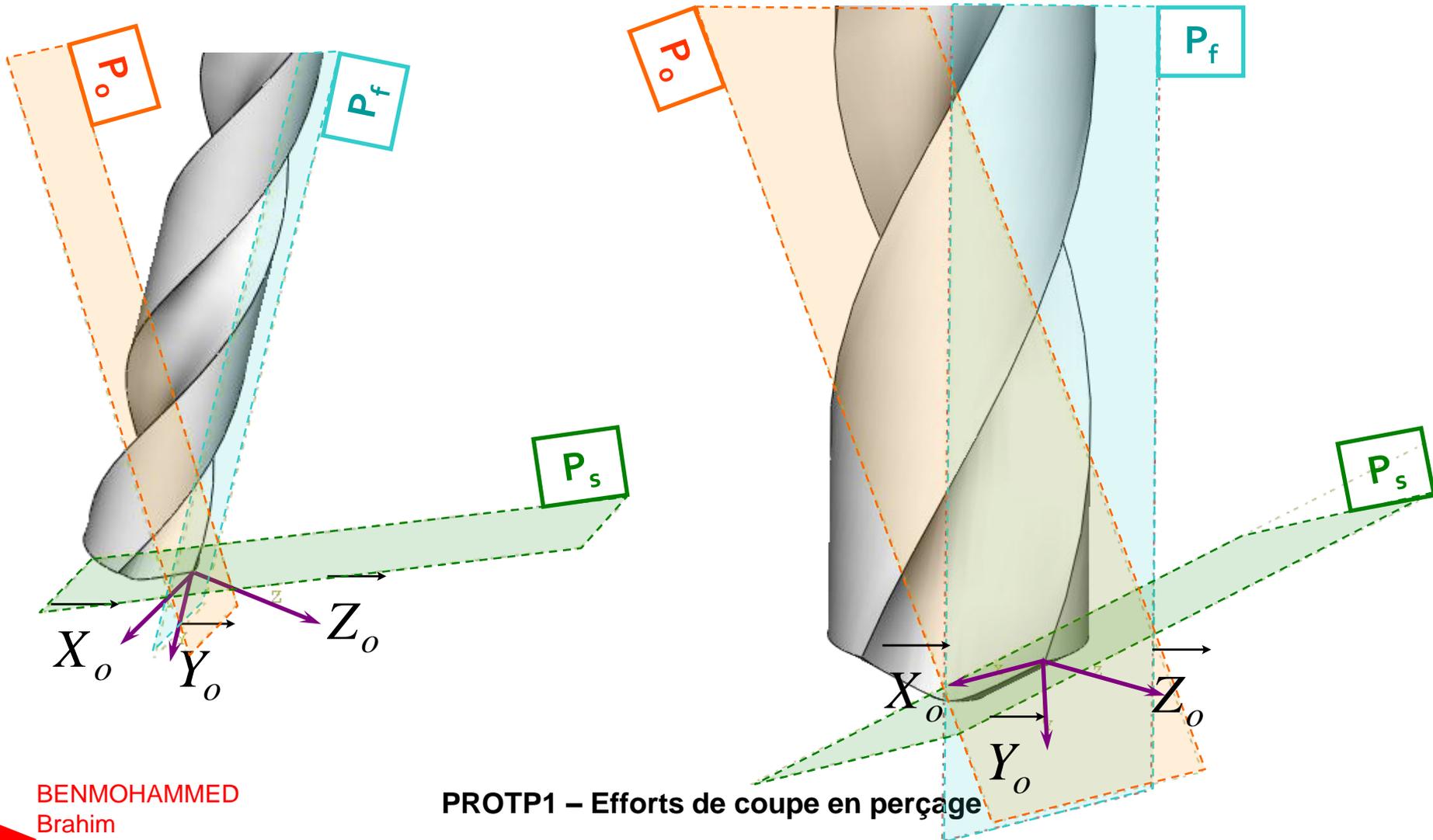
Construction du repère (O, X_0, Y_0, Z_0)



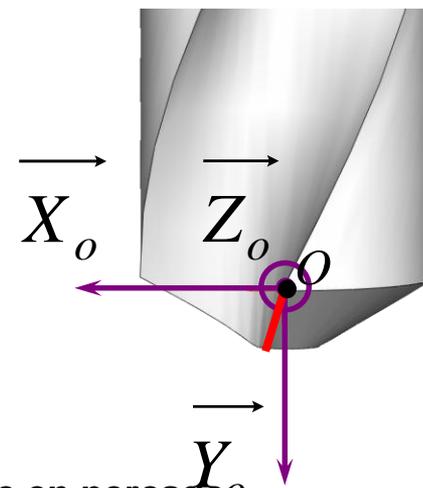
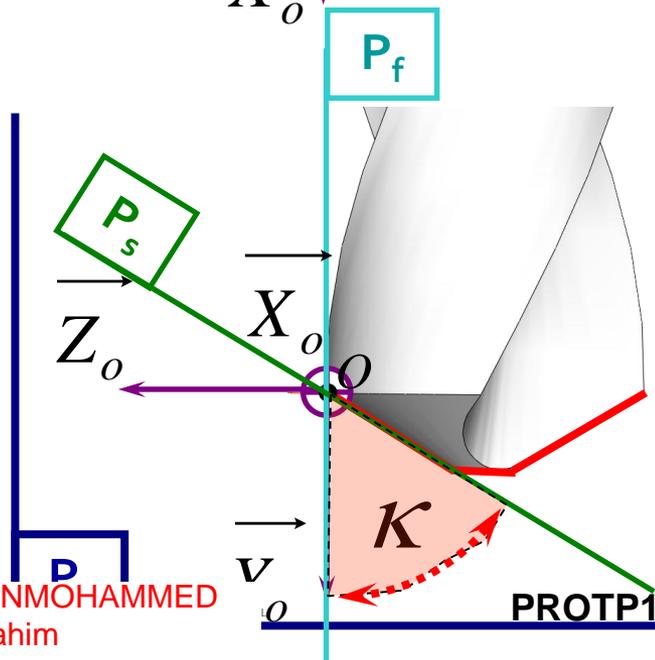
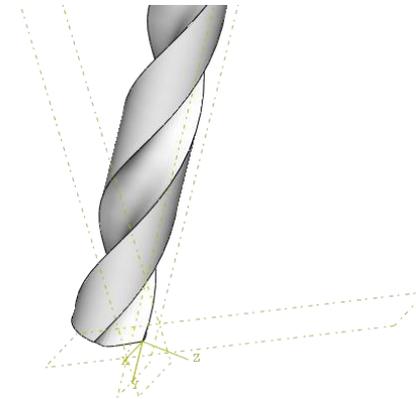
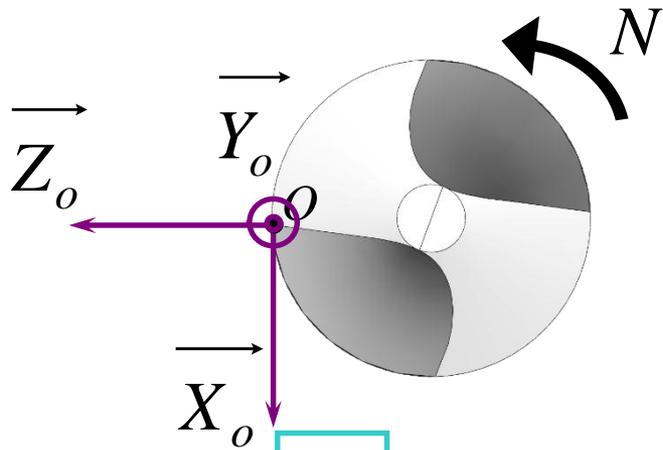
Tracé des plans P_r , P_f , P_s et P_o



Visualisation des plans P_f , P_s et P_o

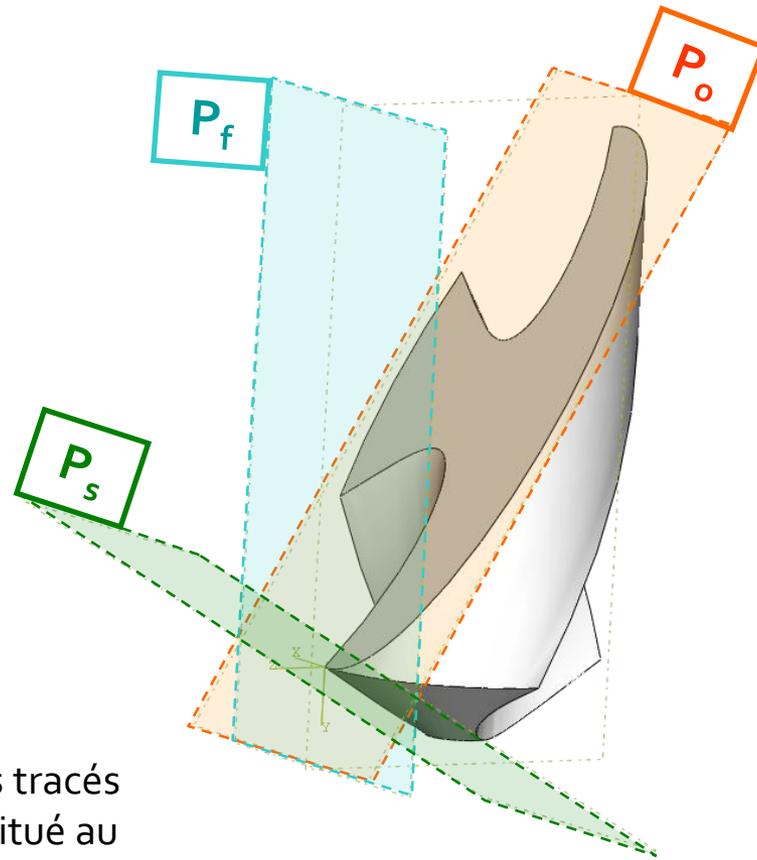
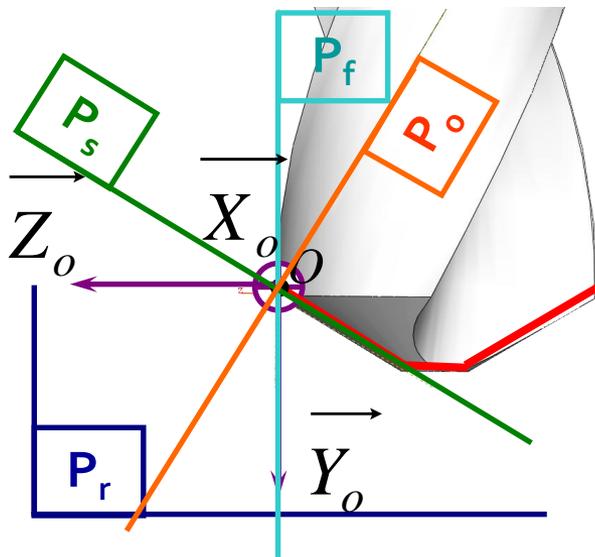


Détermination de l'angle κ dans P_r



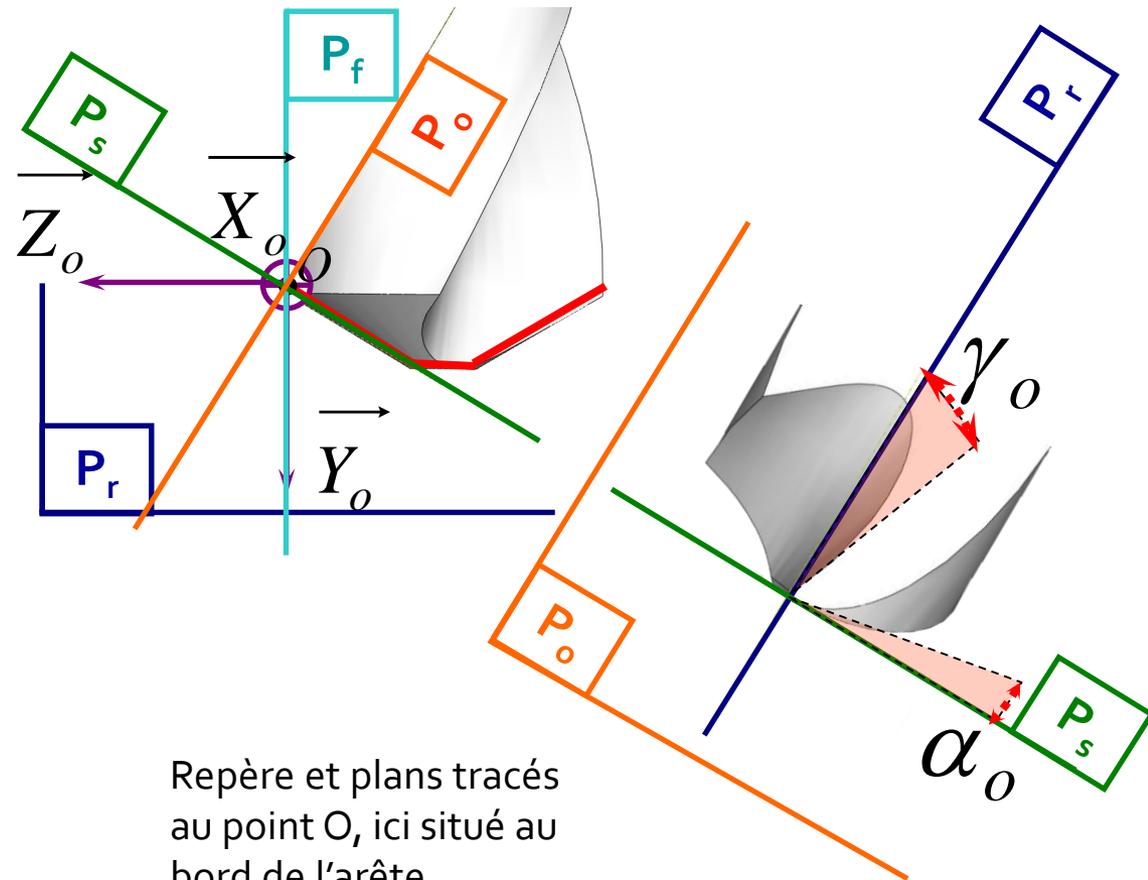
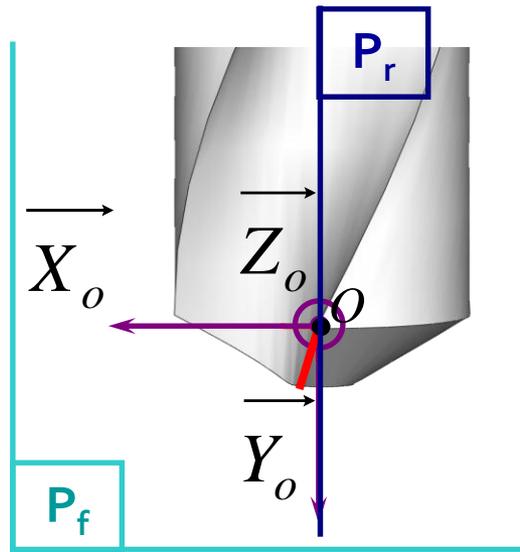
PROTP1 – Efforts de coupe en perçage

Angles α et γ dans P_o au point O

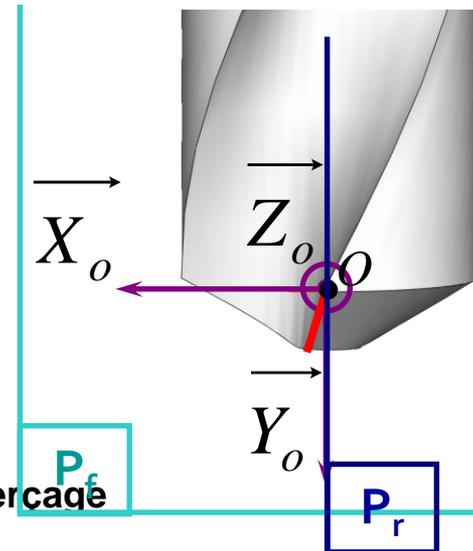
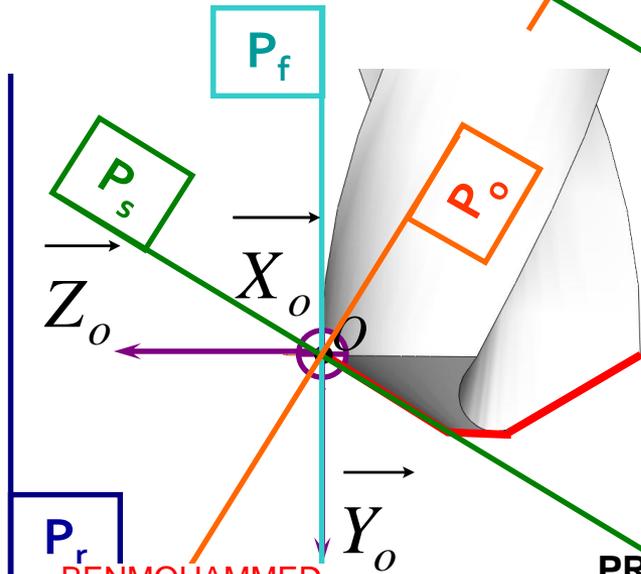
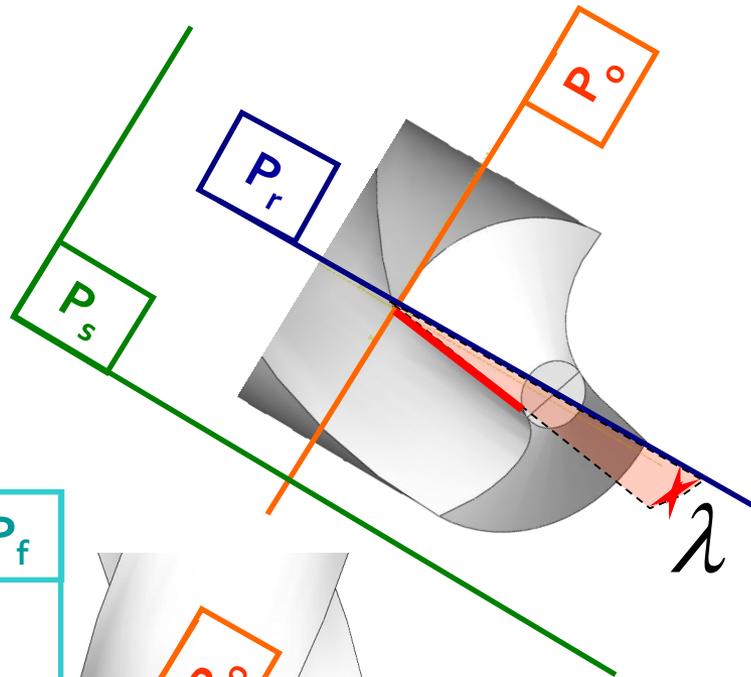


Repère et plans tracés
au point O, ici situé au
bord de l'arête

Angles α et γ dans P_o au point O



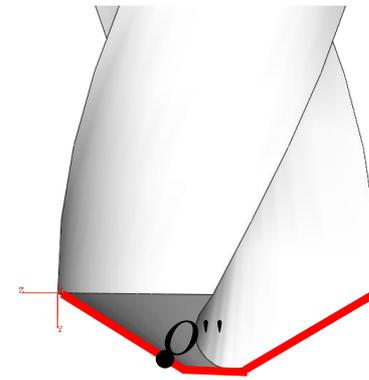
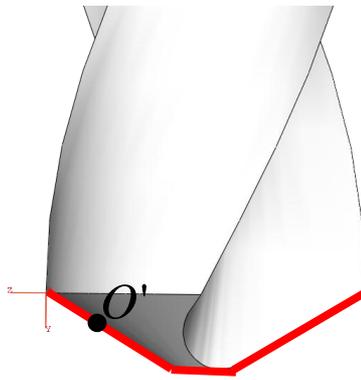
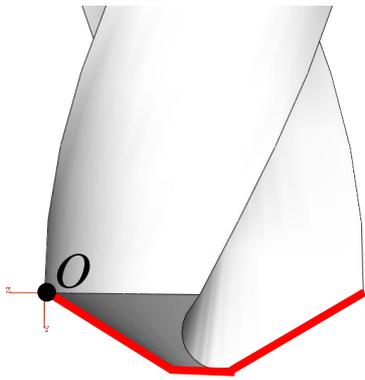
Angle λ dans P_s



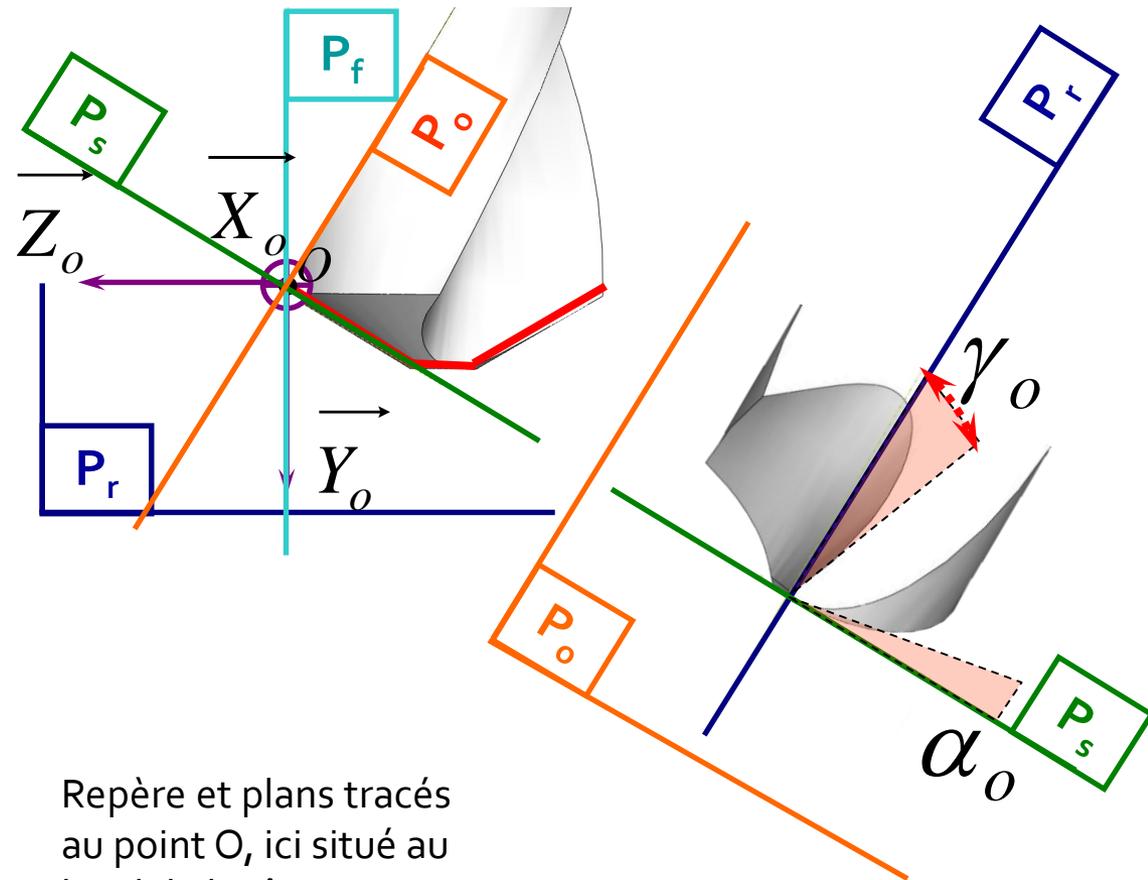
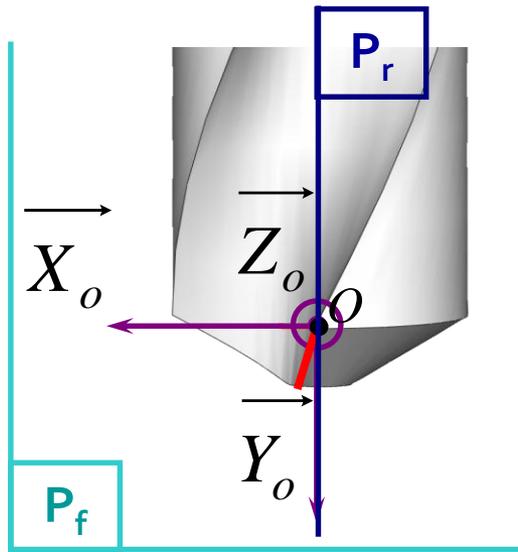
PROTP1 – Efforts de coupe en perçage

Variation des angles en fonction de la position du point O

- Évolution des angles le long de l'arrêt de coupe

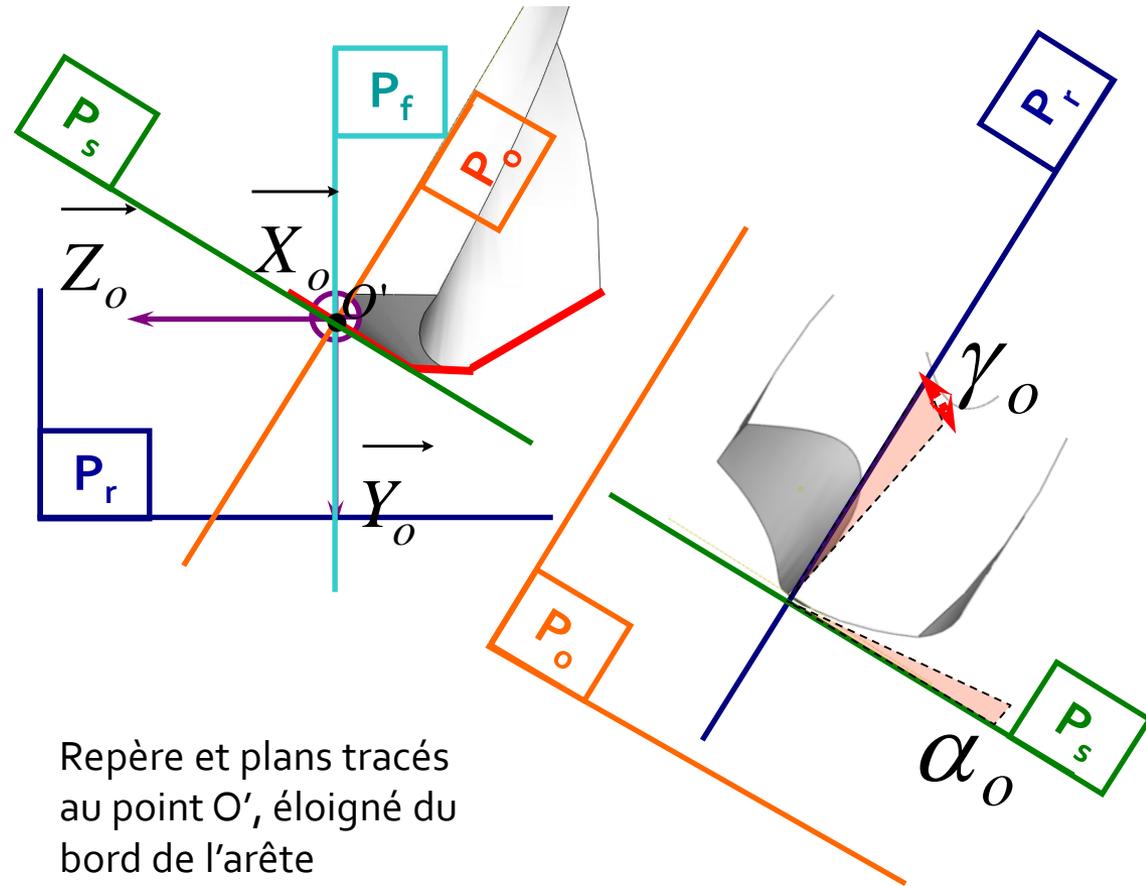
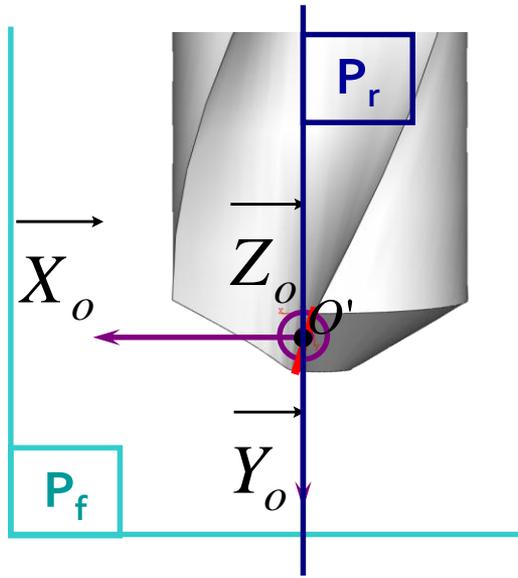


Angles α et γ dans P_o au point O

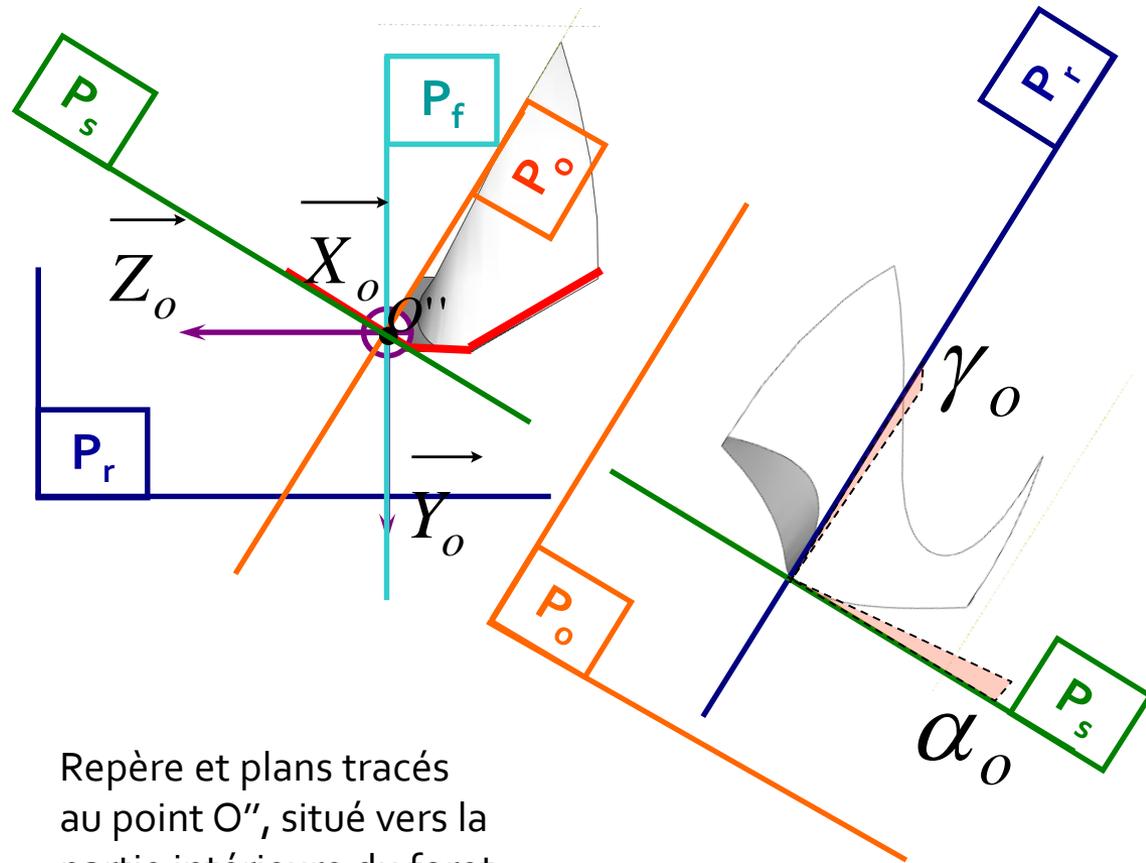
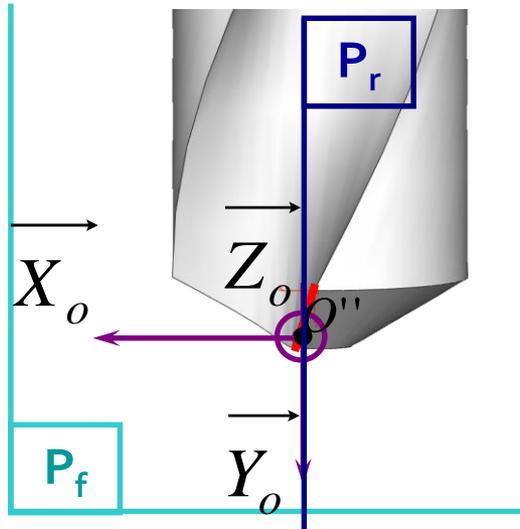


Repère et plans tracés
au point O, ici situé au
bord de l'arête

Angles α et γ dans P_o au point O'



Angles α et γ dans P_o au point O''



Repère et plans tracés
au point O'' , situé vers la
partie intérieure du foret

Chapitre II :

TD 2

« Géométrie de l'outil de coupe »

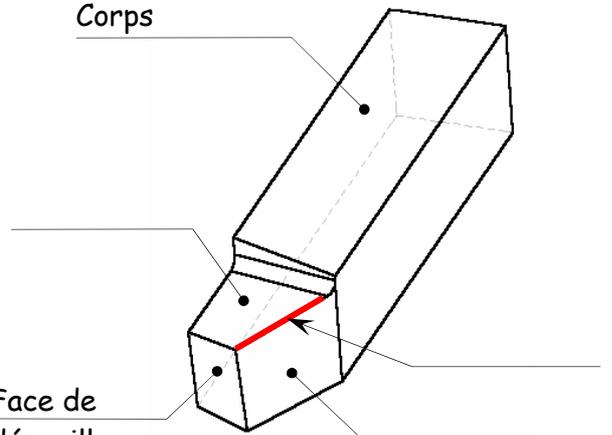
coupe des métaux
-1

1- Généralités :

Un outil coupant est constitué d'un corps d'outil comportant une ou plusieurs parties actives.

La partie active est constituée d'une
intersection de la et de la
.....

Corps



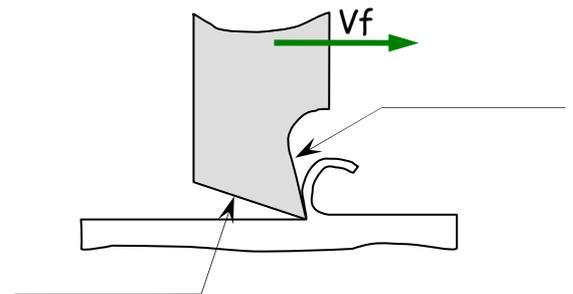
2- Définition des faces de l'outil :

$A\gamma$: \Rightarrow Face sur laquelle glisse le copeau.

$A\alpha$: \Rightarrow Face devant laquelle passe la surface qui vient d'être usinée.

S : \Rightarrow intersection entre $A\gamma$ et $A\alpha$

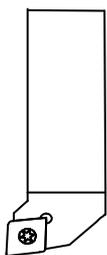
Face de
dépouille
secondaire



Remarque :

Le sens de l'outil est défini par la position de l'arête de coupe (S). En considérant l'outil
verticalement et le bec en bas :

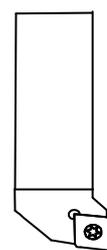
- l'outil est dit à droite, si, son arête tranchante est orientée vers
- l'outil est dit à gauche, si son arête tranchante est orientée vers
- Si la partie active de l'outil est symétrique par rapport à l'axe de l'outil, ce dernier travaille indifféremment à droite et à gauche, l'outil



Outil à plaquette
carbure, à gauche (L)



Outil à plaquette
carbure, neutre (N)



Outil à plaquette
carbure, à droite (R)

3- Définition des plans de l'outil :

L'outil tenu en main, on a :

- P_r =

⇒ C'est un plan au vecteur V_c (vitesse de coupe) et passant par le de l'arête de coupe. Pour un outil rotatif, P_r passe aussi par

- P_f =

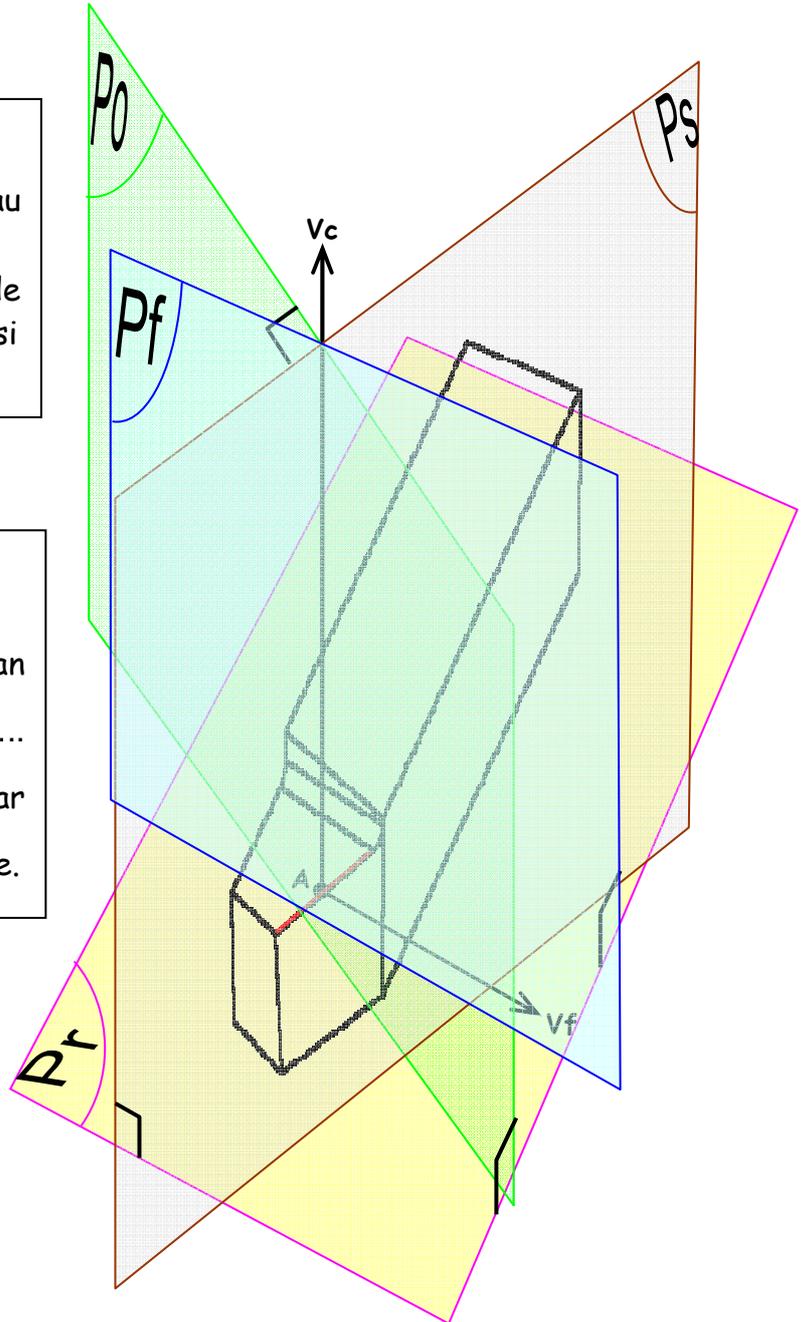
⇒ C'est le plan au plan de référence P_r , qui contient le (vitesse d'avance) et passant par le de l'arête de coupe.

- P_s =

⇒ C'est le plan au plan de référence P_r , qui contient à l'arête de coupe, au

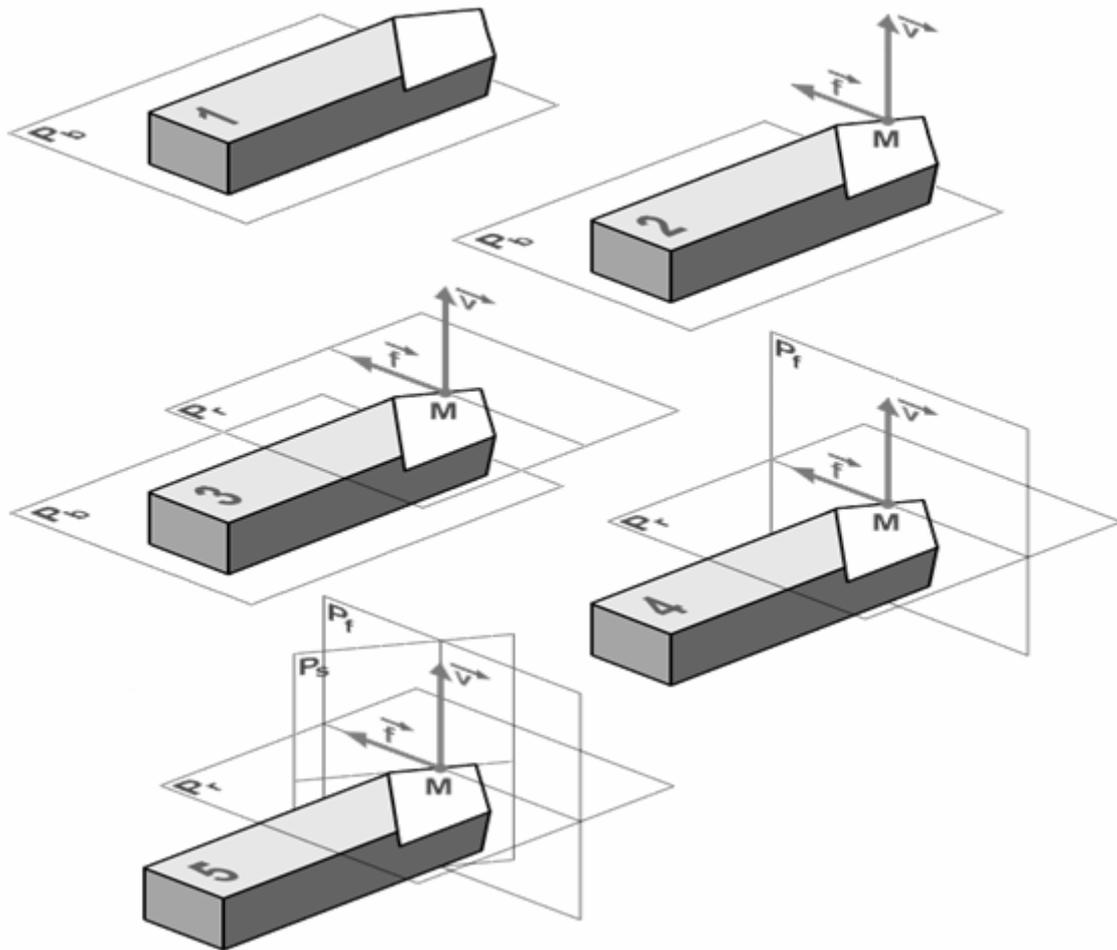
- P_o =

⇒ C'est le plan au plan de référence P_r et au, passant par le de l'arête de coupe.



4- Repérage des plans de l'outil :

Pour pouvoir étudier les caractéristiques de l'outil en main, il faut au préalable avoir défini :



1) P_b : plan de base,

2) M : point considéré de l'arête de coupe.

\vec{V} : Vecteur supposé du

\vec{f} : Vecteur supposé

3) P_r : plan de référence,

4) P_f : plan de travail conventionnel,

5) P_s : plan d'arête de l'outil,

5- Définition des angles caractéristiques :

5.1- Les angles d'arêtes de l'outil :

$\lambda_s = \dots\dots\dots$

Angle aigu mesuré dans $\dots\dots$, compris entre $\dots\dots$ et $\dots\dots$, au point A.

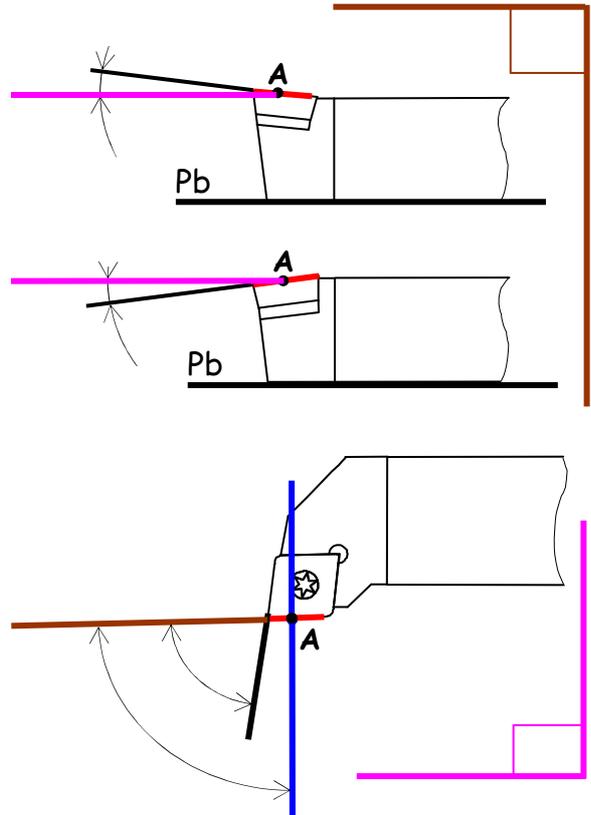
Il peut être positif ou négatif.

$K_r = \dots\dots\dots$

angle aigu mesuré dans $\dots\dots$, compris entre $\dots\dots$ et $\dots\dots$

$\epsilon_r = \dots\dots\dots$

Angle mesuré dans $\dots\dots$ entre $\dots\dots$ et $\dots\dots$



5.2- Les angles des faces de l'outil :

$\alpha_o = \dots\dots\dots$

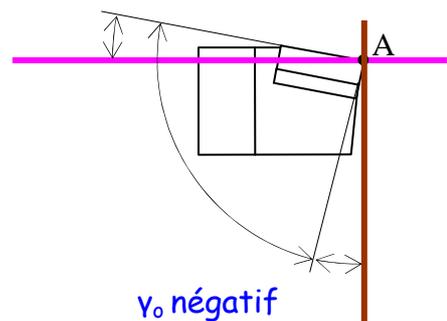
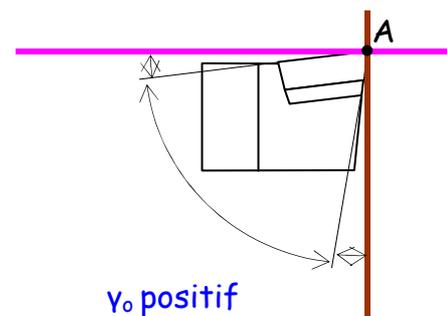
Angle aigu mesuré dans $\dots\dots$, compris entre $\dots\dots$ et $\dots\dots$

$\beta_o = \dots\dots\dots$

Angle mesuré dans $\dots\dots$, compris entre $\dots\dots$ et $\dots\dots$

$\gamma_o = \dots\dots\dots$

Angle aigu mesuré dans $\dots\dots$, compris entre $\dots\dots$ et $\dots\dots$



Rq : $\alpha_o + \beta_o + \gamma_o =$

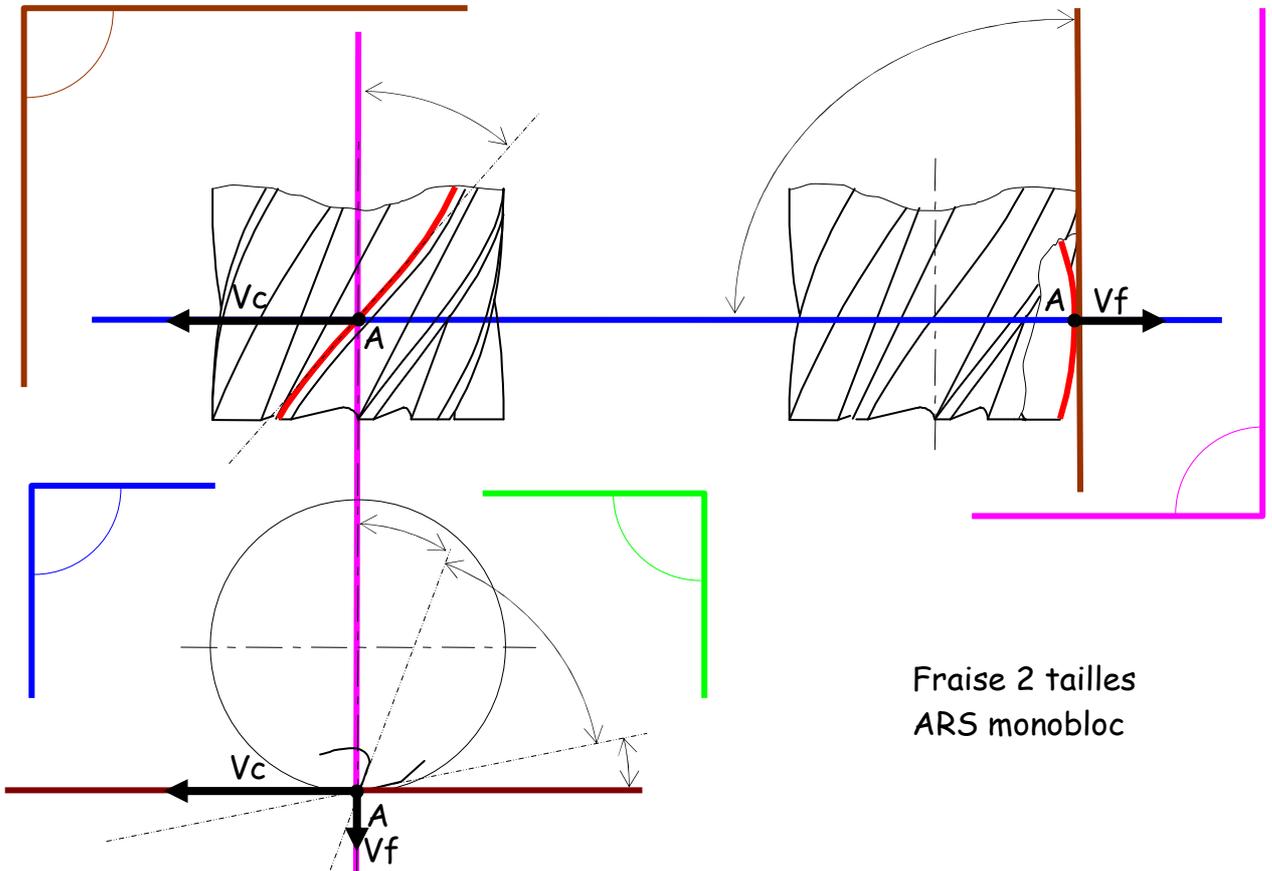
5. 3- Exemples d'outils à charioter droit avec les angles γ_0 et λ_s qui changent :

	$\gamma = 6^\circ$ (Négatif)	$\gamma = 0^\circ$	$\gamma = -6^\circ$ (Positif)
$\lambda = -7^\circ$ (Positif)			
$\lambda = 0^\circ$			
$\lambda = 7^\circ$ (Négatif)			

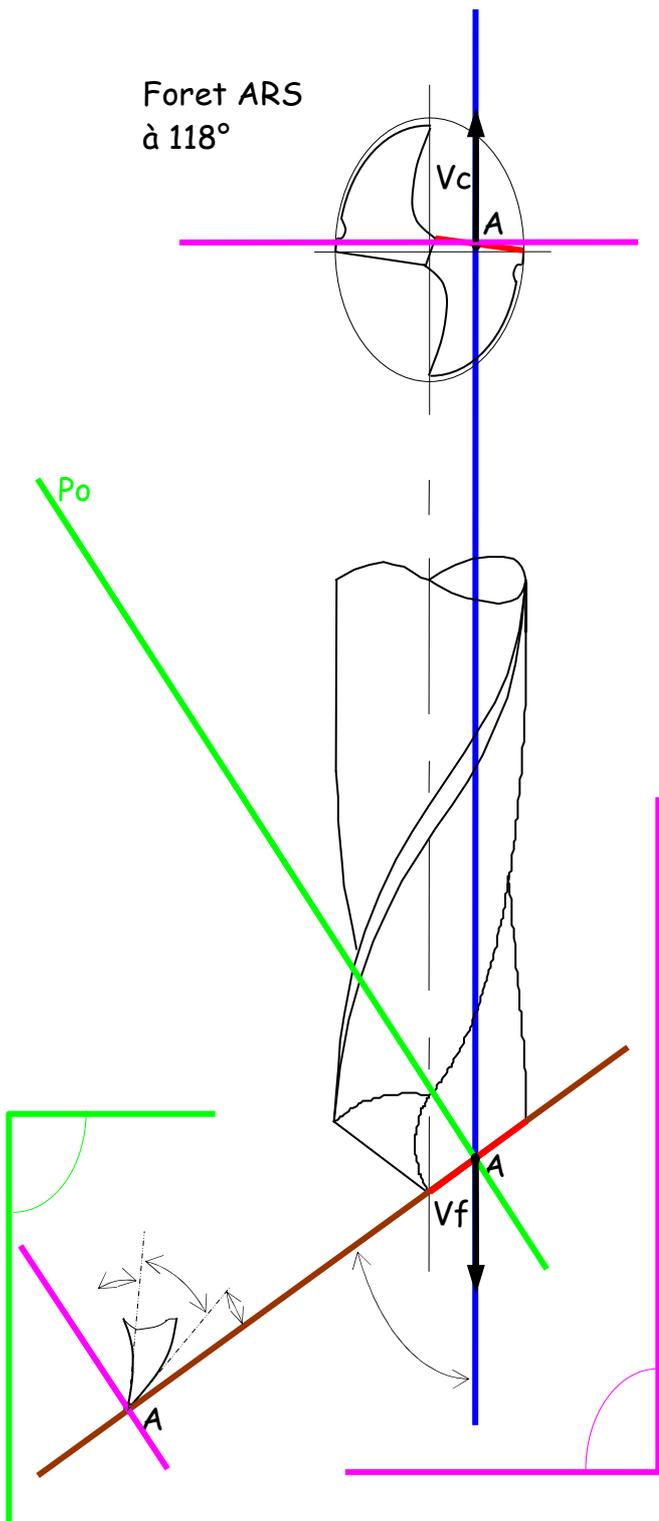
Le choix d'un outil avec une coupe positive ou négative s'effectue essentiellement en fonction de

- Alliage léger (ex : alliage d'aluminium) : Coupe de préférence
- Acier : Coupe de préférence

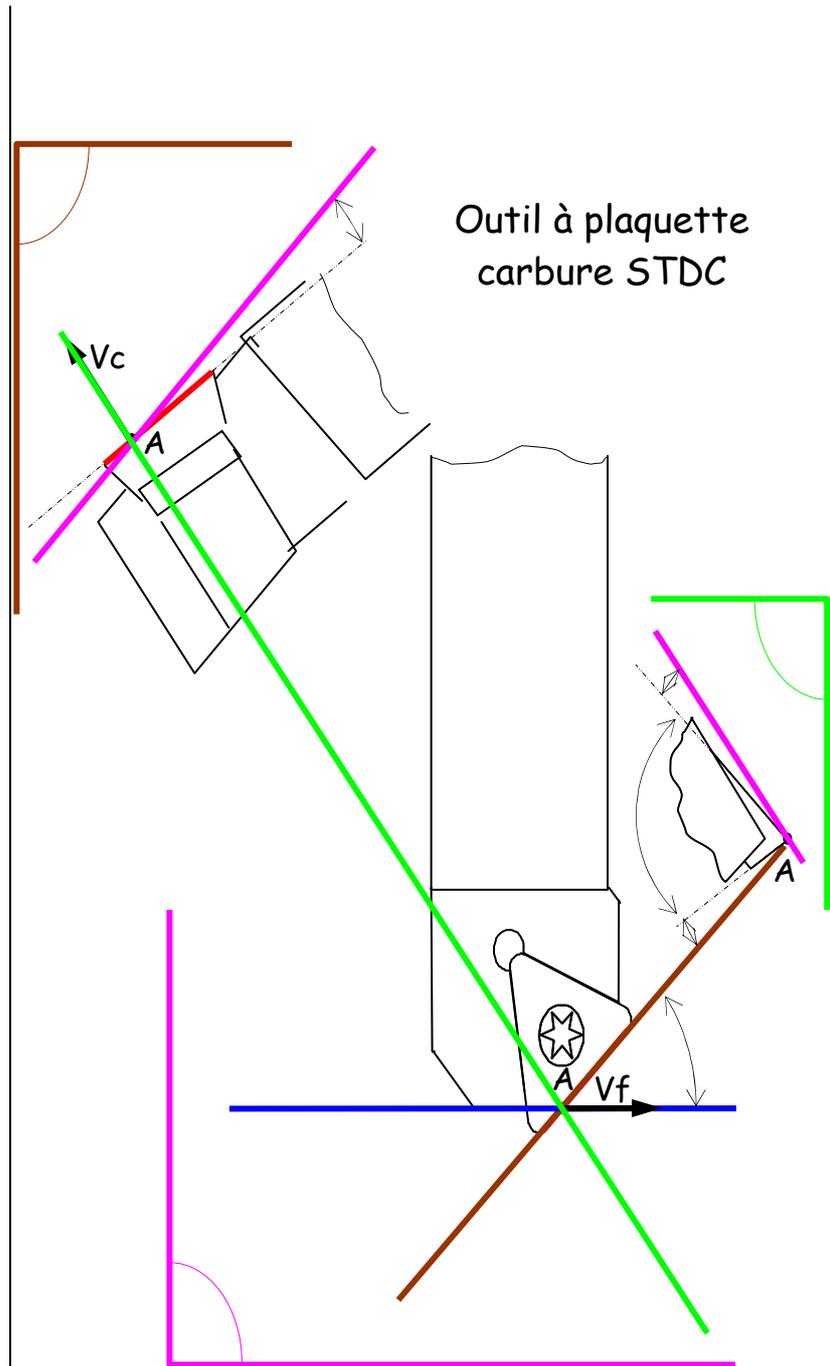
5. 4- Autres outils de coupe :



Foret ARS
à 118°



Outil à plaquette
carbure STDC



6- Méthode de travail :

Voici une méthode pour positionner les angles d'outils et les différents plans.
Respecter l'ordre chronologique :

CHRONOLOGIE DE LA RECHERCHE



1- Constantes de coupe	2- Trièdre de référence	3- Angles d'arêtes	4- Angles des faces
V_c : Vitesse de coupe.	Pr : Plan de référence \perp V _c et passe par A.	λ_s : Angle d'inclinaison d'arête, mesuré dans Ps, entre Pr et S.	α_o : Angle de dépouille orthogonal : angle aigu mesuré dans Po, entre Ps et Aa.
V_f : Vitesse d'avance.	Pf : Plan de travail conventionnel \perp Pr, contient V _f et passe par A.	κ_r : Angle de direction d'arête : angle aigu mesuré dans Pr, entre Ps et Pf.	β_o : Angle de taillant orthogonal : angle mesuré dans Po, entre Aa et Ay.
S : Arête tranchante principale.	Ps : Plan d'arête \perp Pr et contient la tangente à S (ou contient S, si S est rectiligne) au point A.	ϵ_r : Angle de pointe, mesuré dans Pr, entre S et S' (S' : arête secondaire)	γ_o : Angle de coupe orthogonal : angle aigu mesuré dans Po, entre Pr et Ay.
A : Point considéré de l'arête tranchante.	Po : Plan orthogonal \perp Pr et \perp Ps.		

Chapitre III : USURE DES OUTILS-LOIS D'USURE

I. Les causes d'usure des outils	2
II. Usure de l'outil	3
II.1. L'usure de la face en dépouille principale	3
II.1.a. Usure en Dépouille	4
II.1.b. Usure en forme d'entaille	5
II.2. L'usure de la face de coupe	5
II.3. L'usure de la face de dépouille secondaire $A'\alpha$	6
II.4. Autres types d'usure	7
II.4.a. Déformation du bec d'outil	7
II.4.b. Ecaillage	7
II.4.c. Les défaillances	7
II.4.d. Efforts de coupe et température	8
III. Critères de durée de vie et mesurage de l'usure de l'outil	9
III.1. Critères usuels pour les outils en acier rapide	9
III.2. Critères usuels pour les outils en carbures métalliques frittés	9
III.3. Critères usuels pour les outils en céramique	9
III.4. Critère usuel pour tournage de finition	10
IV. Lois de durée de vie	11
IV.1. Evolution de l'usure d'outil dans le temps en fonction de V_c	11
IV.2. Influence des autres paramètres	12

I. Les causes d'usure des outils

Elle est due essentiellement:

- à la diffusion des constituants de l'outil dans le copeau qui est un transfert homogène des molécules de l'outil sur la pièce
- au frottement pièce ou copeau /outil
- à l'oxydation de la matière de l'outil qui est une attaque chimique par l'oxygène
- à l'arrachement mécanique, l'adhésion dus au frottement

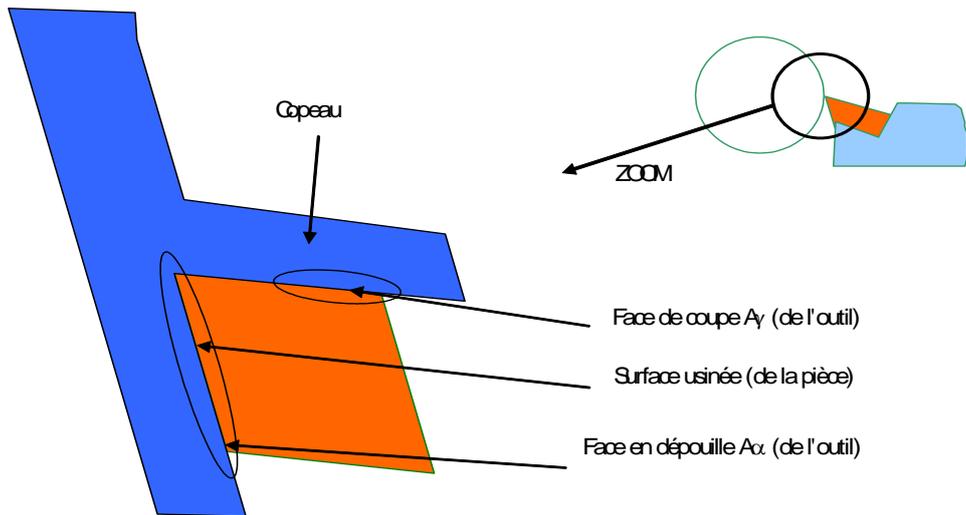


Figure 1

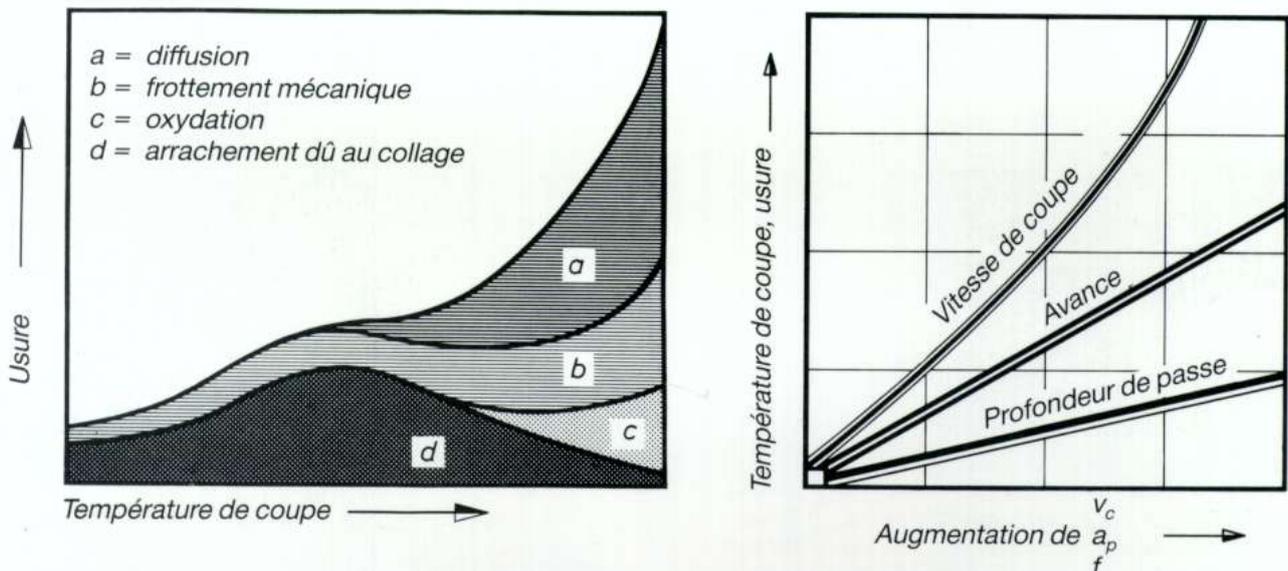


Figure 2 : influence de divers paramètres sur l'usure

II. Usure de l'outil

II.1. L'usure de la face en dépouille principale

Les critères d'usure d'un outil sont définis par la norme. Il s'agit de KM , KB , KT , VB ...

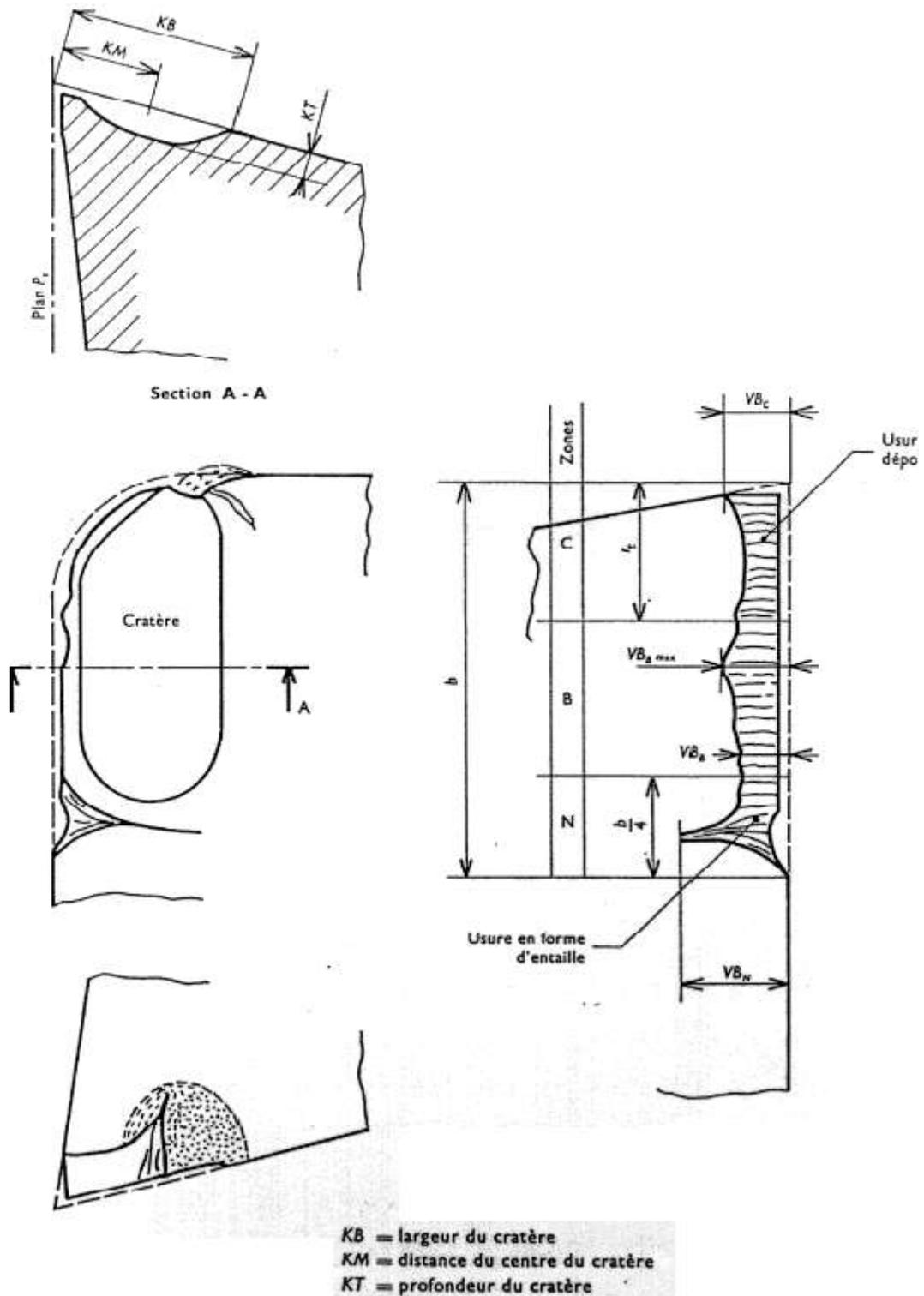


Figure 3

II.1.a. Usure en Dépouille

C'est le type d'usure d'outil le mieux connu. Dans la plupart des cas, **la largeur de l'usure en dépouille est sensiblement uniforme** le long de la portion moyenne de la partie rectiligne de l'arête principale. La largeur d'usure en dépouille est facile à mesurer. L'accroissement de la largeur de l'usure en dépouille conduit à une diminution de la qualité de l'outil.

Tous les matériaux d'outils coupants ont normalement un taux initial d'usure en dépouille élevé et qui, généralement décroît considérablement après un temps de coupe faible sauf si l'on utilise des vitesses de coupe excessives (voir figure-10).



Figure 4 : vue de la face en dépouille et usure correspondante

Les outils en acier rapide peuvent avoir des périodes prolongées d'accroissement à peine mesurable de l'usure en dépouille. Ce phénomène apparaît spécialement à de basses vitesses de coupe lors de l'usinage de matériaux ductiles (qui peuvent s'allonger sans se rompre). A des vitesses de coupe plus élevées, **l'accroissement de l'usure en dépouille pour tous les matériaux d'outils est généralement à peu près uniforme après le taux élevé d'usure initial** (voir figure-10). La portion finale du diagramme de l'usure en dépouille en fonction du temps montre souvent un taux d'usure accélérée qui provoque des défaillances brutales.

La largeur de l'usure en dépouille VBB est une mesure de l'usure de l'outil convenable et une valeur prédéterminée de VBB est considérée comme un bon critère de durée de vie de l'outil.

Pour des raisons de comparabilité, les valeurs de $VBB_{moyen} \leq 0,3mm$ et $VBB_{max} \leq 0,6mm$ sont données.

Une valeur plus faible augmenterait la dispersion des résultats, le taux initial élevé de l'usure ayant trop d'influence.

Une valeur plus élevée aurait été couteuse et aurait pu ne pas être atteinte à tous les essais.

Une usure en dépouille irrégulière est souvent provoquée par l'écaillage de l'arête et est en conséquence traitée plus loin.

II.1.b. Usure en forme d'entaille

C'est une forme spéciale d'usure de la face de dépouille à l'intersection de l'arête principale et de la surface de la pièce, qui rend parfois nécessaire le changement d'outil. La position et la longueur de l'usure en forme d'entaille VBN dépendent de la profondeur de passe et du réglage de cette profondeur à chaque passe.

Exemple : surface plus dure que la couche extérieure (croûte).

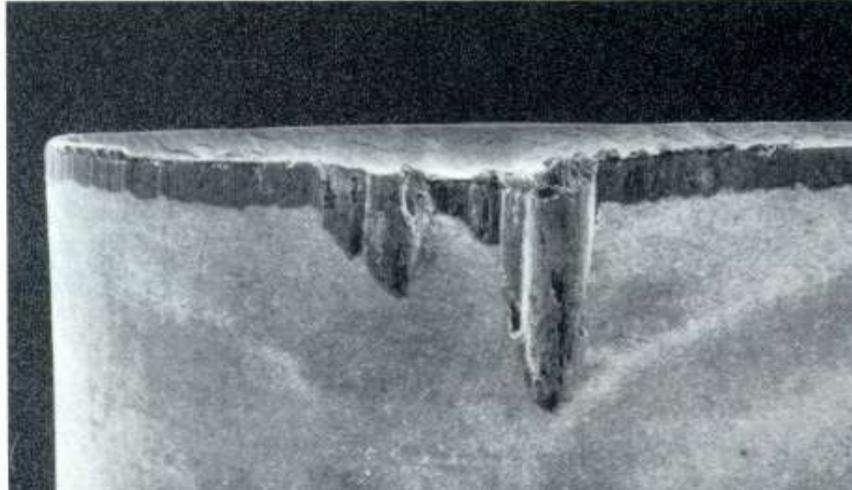


Figure 5 : usure en entaille sur $A\alpha$

L'usure en forme d'entaille est exclue de l'évaluation de la largeur de l'usure en dépouille. Si l'usure en forme d'entaille est prédominante sur les autres phénomènes d'usure de l'outil, sa longueur pourra être utilisée comme mesure de l'usure de l'outil.

La valeur $VBN=1,0\text{mm}$ pourra être utilisée comme critère de durée de vie de l'outil.

II.2. L'usure de la face de coupe

L'usure en cratère est la forme la plus courante d'usure de la face de coupe $A\gamma$ (face sur laquelle glisse le copeau) ; elle est due au contact avec le copeau.

La profondeur du cratère KT (figure-3) peut être utilisée comme mesure d'usure de l'outil et une valeur prédéterminée de KT peut être choisie comme critère de durée de vie de l'outil. L'usure en cratère est plus importante pour les outils en carbures métalliques que pour les outils en acier rapide ou en céramique.

Les valeurs de KT en tant que critère de durée de vie de l'outil sont données en relation avec l'avance $KT=k.f$ ($k=Cte$).

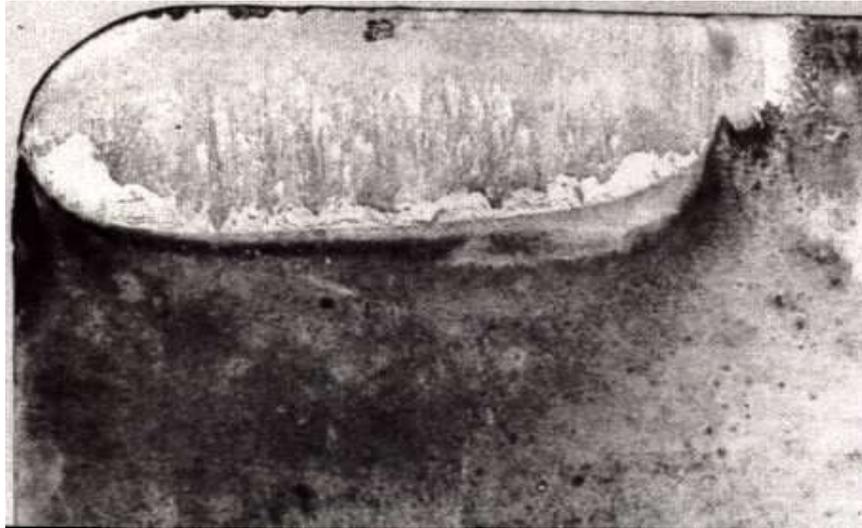


Figure 6 : usure en cratère sur A_y

La position du cratère par rapport à l'arête a également son importance. Un cratère large et profond loin de l'arête peut être moins dangereux pour l'outil qu'un cratère étroit et moins profond près de l'arête.

La distance du centre du cratère KM et la largeur du cratère KB peuvent être mesurées comme informations additionnelles.

La distance du centre du cratère KM (distance entre l'arête principale initiale et le point le plus profond du cratère) est mesurée dans la zone B parallèlement à la face de coupe et perpendiculairement à l'arête principale.

Comme la distance du centre du cratère, KM ne dépend pas uniquement de l'avance mais aussi des matériaux de la pièce et de l'outil, le rapport du cratère $K = \frac{KT}{KM}$ est parfois calculé. Une valeur choisie peut alors être utilisée comme

critère de durée de vie de l'outil et la valeur $K = \frac{KT}{KM} \leq 0,1$ est recommandée.

II.3. L'usure de la face de dépouille secondaire $A'\alpha$

En tournage, la surface engendrée est principalement formée par le bec de l'outil et l'arête secondaire. Toute usure du bec de l'outil a donc un effet sur la surface engendrée.

En tournage de finition, avec de faibles avances, on rencontre souvent un ou plusieurs sillons sur la face de dépouille secondaire après une période de travail, ces sillons provoquent un accroissement de rugosité de la surface engendrée. Une évaluation directe de ce type d'usure de l'outil est difficile, mais son effet peut être évalué par le mesurage de la rugosité de la surface engendrée. Une certaine valeur de la rugosité peut être utilisée comme critère de durée de vie de l'outil ($R_a=3,2$).

L'oxydation de la face de dépouille secondaire conduit souvent à la destruction de l'outil en carbures métalliques lors du tournage, à des températures suffisamment élevées dues à de fortes avances et à des vitesses de coupe élevées.

L'outil peut alors devenir inutilisable par suite de l'oxydation de la face de dépouille secondaire avant que le critère $V_{BB}=0,3\text{mm}$ ou que la valeur

recommandée de KT soient atteints. La détérioration de la surface engendrée provoquée par la destruction de la face de dépouille secondaire doit alors être utilisée comme critère de durée de vie de l'outil. **Le choix du critère se fait donc en fonction de l'usure de l'outil.**

II.4. Autres types d'usure

II.4.a. Déformation du bec d'outil

Elle peut provoquer la destruction d'outils en acier rapide ou carbure métallique lorsque les conditions de coupe sont sévères.

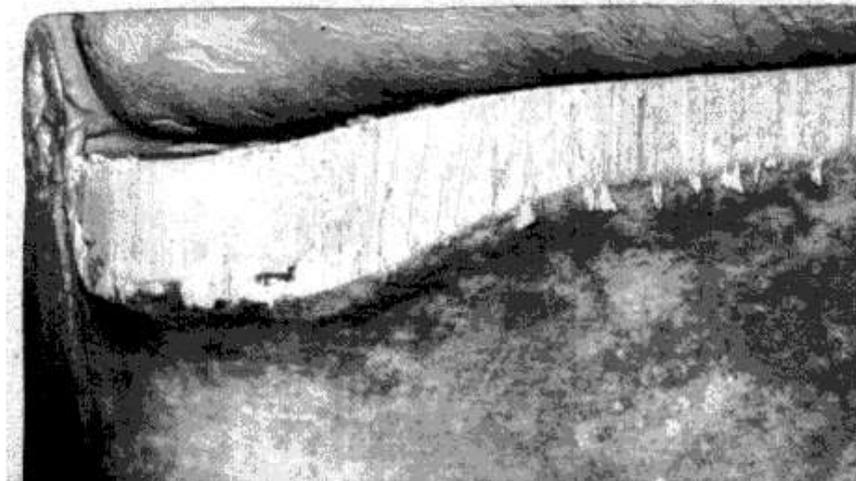


Figure 7 : effondrement de l'arête sur $A\alpha$

La déformation du bec de l'outil provoquera, dans la plupart des cas, une apparition plus rapide de la défaillance brutale de l'outil en acier rapide et rendra plus importantes les conséquences **d'oxydation des outils en carbures métalliques**. Il peut arriver que les conditions de coupe soient si sévères que la déformation commence immédiatement après le début de la coupe. Dans de tels cas, la durée de vie de l'outil est généralement très courte.

Il est donc recommandé que la durée de vie de l'outil ne soit pas inférieure à 5 minutes pour les matériaux normaux et à 2 min pour les matériaux coûteux.

II.4.b. Ecaillage

L'écaillage de fines particules de l'arête et la fissuration thermique (que l'on rencontre fréquemment dans les usinages interrompus) sont importants pour des outils en **matériaux fragiles**. L'importance de l'écaillage et de la fissuration thermique est évaluée jusqu'à un certain point par la largeur maximale d'usure en dépouille VBB_{max} . Aussi, la valeur $VBB_{max}=0,6$ mm est-elle indiquée comme critère de durée de vie de l'outil.

Exemple : usinage de la fonte avec des plaquettes pas suffisamment tenaces

II.4.c. Les défaillances

Tout mode de défaillance ou déformation de l'outil, anormalement rapides et, par conséquent aléatoires et imprévisibles qui mettent fin à la durée de vie de

l'outil, peuvent être provoquées par une zone dure dans la pièce à usiner ou par un accident dans le fonctionnement de la machine-outil. Un outil d'une série peut **casser**, **s'écailler** fortement, se **déformer** ou avoir une autre défaillance imprévisible.

L'apparition de défaillance prématurée annule l'essai. Ceci peut être le cas de l'usinage de matériaux très durs et hétérogènes avec un outil en matériau fragile (par exemple en céramique), ou avec un outil de forme fragile.

II.4.d. Efforts de coupe et température

Un accroissement important des efforts de coupe et de la température en fonction du temps de coupe est quelquefois utilisé comme base de critères de durée de vie des outils en recherche scientifique et dans des systèmes de commande adaptative.

Ceci n'est pas couvert par la présente norme. Efforts et température peuvent être mesurés comme informations complémentaires. Il faudra garder présent à l'esprit que la plupart des dynamomètres sont moins rigides qu'un porte-outil normal, c'est pourquoi les efforts sont mesurés indirectement sur la vis d'entraînement du trainard.

Le résultat peut être une augmentation des vibrations qui affectent l'usure de l'outil, une autre méthode est de mesurer le spectre du bruit produit par l'usinage et d'en fixer les limites correspondant à l'usure maxi tolérable.

III. Critères de durée de vie et mesurage de l'usure de l'outil

Le mode d'usure qui semble contribuer à la fin de la durée de vie utile de l'outil devra servir de guide pour le choix du critère. Le type et la valeur du critère utilisé devront être notés au procès verbal.

Remarque : Si le mode d'usure prédominant n'est pas évident, il est possible d'utiliser soit deux courbes V-T, soit un critère mixte donnant une courbe V-T brisée (cas typique d'une avance de 0.4mm/t, la vie de l'outil devra être considérée terminée lorsque $VBB=0,3\text{mm}$ ou $Kt=0,18\text{mm}$ est atteint).

III.1. Critères usuels pour les outils en acier rapide

Les critères les plus généralement utilisés pour les outils en acier rapide sont les suivants

- défaillance brutale,
- largeur moyenne de l'usure en dépouille $VBB=0,3\text{ mm}$ si l'usure en dépouille est considérée régulière dans la zone B,
- largeur maximale de l'usure en dépouille $VBB_{max}=0,6\text{ mn}$ si l'usure en dépouille est irrégulière, rayée, écaillée ou fortement striée dans la zone B.

III.2. Critères usuels pour les outils en carbures métalliques frittés

Les critères généralement utilisés pour les outils en carbures métalliques frittés sont les suivants :

- largeur moyenne de l'usure en dépouille $VBB=0,3\text{mm}$ si l'usure en dépouille est considérée comme régulière dans la zone B,
- largeur maximale de l'usure en dépouille $VBB_{max}=0,6\text{mm}$ si l'usure en dépouille est irrégulière dans la zone B,
- profondeur du cratère KT , en millimètres, donnée par la formule :
 $KT=0,06+0,3 f$
où f est l'avance en millimètres par tour.

Pour les avances "standard", ceci aboutit aux valeurs suivantes de KT lorsque KT est pris comme critère :

Avance f en mm/t	0,2	0,4	0,63
	5		
Profondeur Kt en mm	0,14	0,18	0,25

III.3. Critères usuels pour les outils en céramique

Les critères les plus généralement utilisés pour les outils en céramique sont les suivants:

- largeur moyenne de l'usure en dépouille $VBB=0,3\text{ mm}$ si l'usure en dépouille est considérée régulière dans la zone B,
- largeur maximale de l'usure en dépouille $VBB_{max} =0,6\text{ mm}$ si l'usure en dépouille est irrégulière dans la zone B,
- défaillance brutale.

III.4. Critère usuel pour tournage de finition

La rugosité de surface est un critère usuel pour le tournage de finition et les valeurs suivantes de Ra (voir NF E 05-016) sont recommandées.

0,4--0,8--1,6--3,2--6,3--12.5

On retiendra :

Outil	Critère en ébauche	En finition
ARS	Défaillance brutale VBB moyen = 0,3mm VBB maxi = 0,6mm	Rugosité > Ra = 3,2
Carbure	VBB moyen = 0,3mm VBB max = 0,6mm $KT = 0,06mm + 0,3 * f$	Rugosité
Céramique	Défaillance brutale VBB moyen = 0,3mm VBB max = 0,6mm	Rugosité

IV. Lois de durée de vie

IV.1. Evolution de l'usure d'outil dans le temps en fonction de Vc

L'usure est sensiblement linéaire dans le temps, pour un outil rodé. On peut éviter l'usure accélérée du début, de même que la partie non linéaire survient qu'après limite d'usure de cet outil.

On peut donc déterminer les temps T_i pour lesquels on atteint la limite de durée de vie pour une vitesse V_i .

En prenant le même critère et en veillant à ce que toutes les autres variables restent constantes (f , a_p), il est possible de déterminer la relation liant la durée de vie d'un outil à la vitesse de coupe.

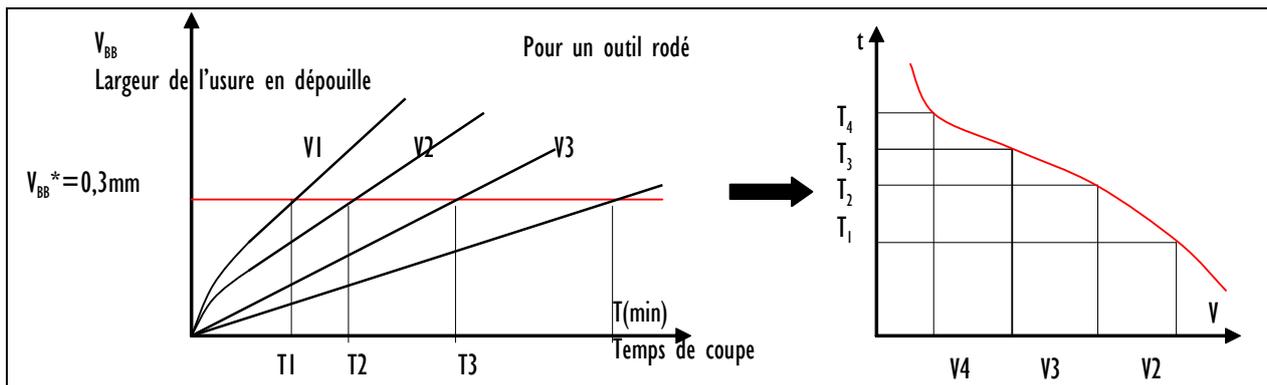


Figure 8 : usure en dépouille pour différentes vitesses de coupe

Cette courbe est difficilement exploitable ; aussi est-il intéressant de la tracer dans un repère dont les échelles sont logarithmiques.

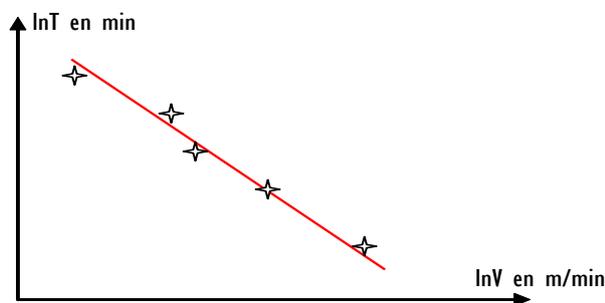


Figure 9

Elle devient pratiquement une droite, dans la zone d'utilisation courante des outils : $\ln T = a \cdot \ln V + b$ soit : $T = A \cdot V^a$. Elle est connue sous le nom de droite de TAYLOR.

La norme lui donne le nom de courbe V-T. Son équation est écrite sous la forme :

$$V \cdot T^{(-1/k)} = C ; C \text{ étant une constante}$$

V est la vitesse de Coupe en m/min

T est la durée de vie de l'outil à la vitesse V et s'exprime en mn

K est $\text{tg}(\alpha)$, pente de la droite, il dépend du matériau de la pièce et de l'outil

C est une constante qui correspond à la vitesse de coupe qui donnerait une durée de vie de 1 mn. Pour les aciers usinés au CM, C vaut de 200 à 800 m/mn.

Quelques valeurs de k pour l'usinage des aciers :

k	Matériau à outil
-5 à -8	ARS
-2.5 à -6	Carbure
-1.5 à -2.5	Céramique

Remarque : on note V_{15} la vitesse de coupe qui donne une durée de vie de 15 mn.

Influence des autres paramètres de coupe.

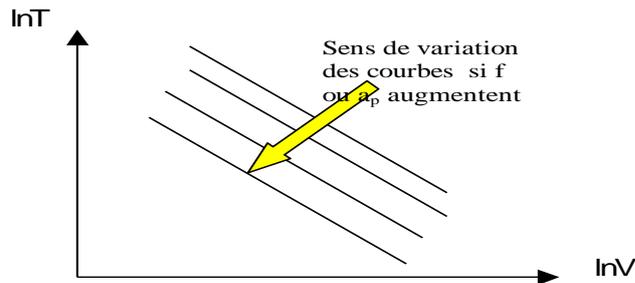


Figure 10

Taylor (1902) ne tiendra pas compte de l'avance ou de la profondeur de passe ce qui diminue sensiblement le nombre d'essai. Le CETIM reprendra sa méthode en précisant le type d'usinage (ébauche ou finition).

On remarquera la précision apportée à la définition de l'outil utilisé.

L'ENSAM reprend cette formule sous la forme $T = C_v \cdot V^n$

IV.2. Influence des autres paramètres

Les tableaux sont construits à partir du modèle de GILBERT (1950) ou TAYLOR généralisé $T = C \cdot V^n \cdot f^x \cdot a_p^y$

Ce modèle est plus complet que celui de Taylor mais il est très difficile de conduire des essais d'après ce modèle vu le nombre de variables. En effet un nombre de mesure de 4 est minimum pour éviter les points aberrants dans la mesure de l'usure par rapport à chacun des paramètres ; ce qui nous donne pour 3 paramètres 48 essais.

DUREE DE VIE D'UN OUTIL DE COUPE : LOI DE TAYLOR

DUREE DE COUPE D'UN OUTIL:

Par définition la durée de coupe ou de vie T d'un outil selon la norme ISO 3685 : *C'est le temps de coupe totale d'un outil nécessaire pour atteindre un critère de durée de vie spécifique.*

Il est nécessaire de passer par une approche expérimentale, pour arriver à estimer le temps de service d'un outil de coupe pour des conditions de coupe bien définies, en général c'est le critère d'usure VB_B ou KT qui est pris en compte. Des mesures de VB_B sont prises au cours du temps d'usinage jusqu'à la ruine de l'outil, pour différents niveaux de vitesse de coupe.

Un tracé des données expérimentales est présenté dans la figure IV.7. les courbes donnant l'évolution de l'usure en dépouille ou en cratère en fonction du temps suivent le modèle mathématique de Koren et Lenz (Equation IV.1):[5]

$$VB_B = A.(1 - e^{-at}) + B.(e^{\beta t} - 1) \quad (IV.1)$$

l'équation IV.1 est dite loi d'usure de l'outil, elle regroupe deux termes distincts. Le premier représente l'évolution de l'usure abrasive et le second celle de l'usure par diffusion.

Des derniers résultats de la figure IV.7 et pour un critère d'usure donné, on peut tracer la courbe de la durée de vie en fonction de la vitesse de coupe. Dans la courbe $T = f(V_c)$ figure IV.8 on remarque trois zones qui la caractérise :

- **Zone AB** : zone des faibles vitesses de coupe, cette partie de la courbe est inexploitable,
- **Zone BC** : zone stationnaire, le temps est constant (usure stable),
- **zone CD** : le temps décroît (usure accélérée) en suivant une droite de pente négative en fonction de la vitesse de coupe, ce domaine est exploitable et il donc possible d'interpréter le phénomène par un modèle mathématique.

C'est en 1907 que Taylor a proposé son modèle pour estimer la durée de vie d'un outil (loi de Taylor). (Equation IV.2)

$$T = C_V V_c^n \quad (IV.2)$$

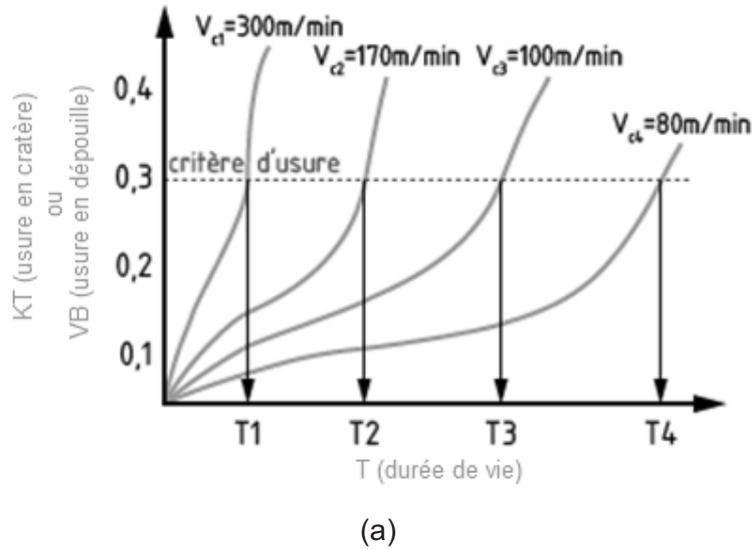


Figure.IV.7. Evolution de l'usure frontale en fonction du temps [6,7]

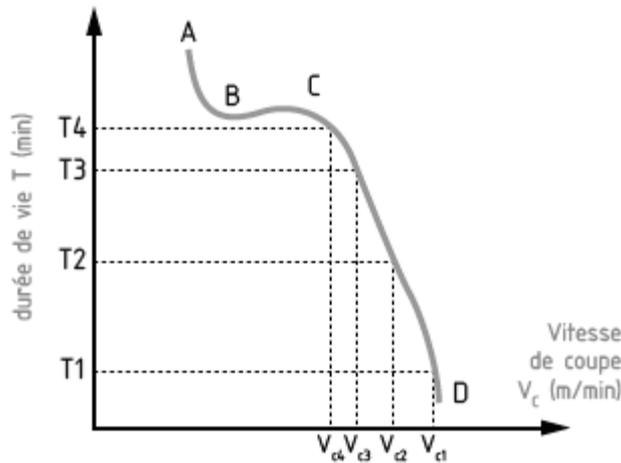


Figure.IV.8. Courbe de durée de vie en fonction de la vitesse de coupe [6]

- L'exposant n dépend : de la profondeur de passe, avance, matériau usiné et matériau constituant de l'outil et il a une valeur : $-10 < n < -1$. (Tableau IV.2)

Tableau IV.2 Valeurs moyenne de l'exposant n de la loi de Taylor.

Matériau d'outil	ARS / HSS	Carbure	Carbure revêtu	Céramique
n	-6	-4	-3	-2

- La constante C_v dépend essentiellement du matériau usiné et des conditions de coupe. Sa valeur est très variable : $10^4 < C_v < 10^{14}$.

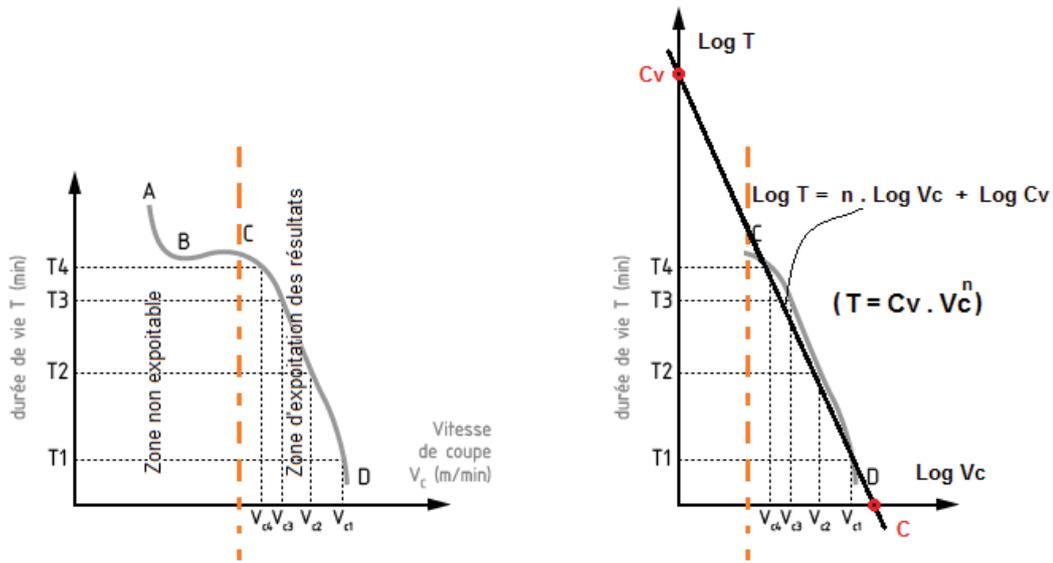


Figure IV.9. Analyse graphique par le loi de Taylor[6]

Comme la courbe de la zone CD à une allure d'une droite (Figure IV.9), la loi de Taylor serait la plus correcte.

On déterminant les constantes C_v et n des données expérimentaux (Figure IV.9) la loi d'usure (l'équation de Taylor) sera déduite. A partir de cette loi, Il serait possible de fixé un temps de coupe et retrouver la vitesse de coupe associée.

L'équation IV.2 peut être formulée comme suite :

$$V_c = C_T \cdot T^\alpha \tag{IV.3}$$

avec $\alpha = 1/n$ et $C_T = (1/C_v)^{1/n}$

Tableau IV.3 Valeurs du coefficient α .

Matériau d'outil	Acier rapide	Carbure métallique	Céramique
α	0,1 – 0,125	0,2 – 0,3	0,4 – 0,5

D'autres modèles empiriques ont été annoncées après Taylor comme : [8]

Modèle de Gilbert ou le modèle de Taylor généralisé en 1950

$$V_c = C \cdot f^x \cdot a^y \cdot V_c^n \tag{IV.4}$$

où f est l'avance, a est la profondeur de passe et x, y, n sont .

La constante C : dépend du Couple Outil / Matière

Les coefficients x, y et n : dépendent que du matériau constituant l'outil,

avec

$$x \approx n/6 \text{ et } y \approx n/3$$

et

x, y, n sont toujours < 0 .

Modèle de Colding en 1959

$$k + A.x + B.x^2 + C.y + D.y^2 - z + E.z^2 + F.x.y + G.y.z + H.x.z \tag{IV.5}$$

avec k, A, B, C, D, E, F, G et H des constantes, $x = \ln a, y = \ln V_c$ et $z = \ln T$

Modèle de König-Depiéreux en 1969

$$T = \exp(-\alpha V_c^v - \gamma a^\mu - \sigma a^\lambda) \tag{IV.6}$$

Modèle de Kronenberg en 1970

$$T = C (V + k)^m \tag{IV.7}$$

k, C et m sont des constantes.

Remarque IV.3

- La valeur de $VB_B = 0,3 \text{ mm}$ est la limite acceptable pour les opérations d'ébauche. En usinage d'ébauche les conditions de coupe sont les plus défavorables et l'outil est le plus sollicité pendant cette période.
- Par contre en demi-finition et finition, la précision des pièces est de rigueur, il est donc judicieux de choisir une valeur inférieure à $VB_B = 0,3 \text{ mm}$.
- La plupart des travaux de fabrication dans l'industrie sont en série (petite, moyenne et grande série) où l'usure des outils affecte considérablement la productivité. Afin d'optimiser la production, il est conseillé de choisir un temps d'usure d'outil inférieur de **10 % à 20 %** du temps calculer pour une usure VB fixée par les critères de durée de vie.
- Lorsque le coefficient n est très conséquent (grand en valeur absolue), il indique que la loi de Taylor a une forte dépendance à la vitesse, cela traduit que le matériau de l'outil a une faible résistance à l'usure.
- Les valeurs usuelles du coefficient n pour des opérations en tournage, fraisage et perçage peuvent regrouper dans le tableau IV.4.

Tableau IV.4 Valeurs du coefficient n selon l'opération et la matière usinée.

Outil de coupe	Opération d'usinage	Matériau de la pièce à usiner			
		Aciers	Fontes grises	Fontes malléables	Alliages d'aluminium
Acier rapide RAS	Tournage	-8,5	-10	-8,5	-2,5
	Fraisage	-5	-6,5	-5	-2
	Perçage	-5	-8,5	-8,5	-2,5
Carbure métallique	Tournage	-4,5	-5	-5	-2,5
	Fraisage	-3	-3	-3	-2
	Perçage	-3,5	-2,5	-2,5	-2,5

Exemples

Afin d'optimiser les coûts d'usinage, il est nécessaire de déterminer la loi d'usure de l'outil pour une opération effectuée dans la machine-outil. Les données expérimentales sont données dans le tableau ci-dessous (Tableau VI.5).

- Déterminer la loi d'usure (**loi de Taylor**) pour cette opération d'usinage.

Tableau IV.5 Valeurs expérimentales de l'usure d'un outil de coupe après un temps d'usinage.

Vc1 [450 m/min]		Vc2 [300 m/min]		Vc3 [250 m/min]		Vc4 [200 m/min]		Vc5 [150 m/min]		Vc6 [100 m/min]	
Temps [min]	VBB [mm]										
1,43	0,13	1,49	0,08	3,05	0,09	2,97	0,08	2,97	0,05	3,02	0,04
2,35	0,20	2,97	0,12	4,48	0,12	6,00	0,12	5,21	0,08	5,97	0,07
3,10	0,25	4,74	0,16	6,07	0,15	8,86	0,15	7,33	0,09	9,02	0,09
4,12	0,32	6,00	0,19	7,82	0,18	11,65	0,18	9,78	0,11	11,97	0,11
5,47	0,39	7,53	0,24	9,02	0,20	14,21	0,20	11,99	0,12	14,99	0,13
		8,92	0,28	11,08	0,22	15,98	0,24	15,12	0,14	18,95	0,16
		10,61	0,33	12,75	0,26	18,93	0,28	18,95	0,18		
		11,97	0,37	15,07	0,3						
				17,65	0,35						
				19,86	0,40						

Réponse

1. Les données du tableau IV.5 sont représentés graphiquement dans la figure VI.10 :

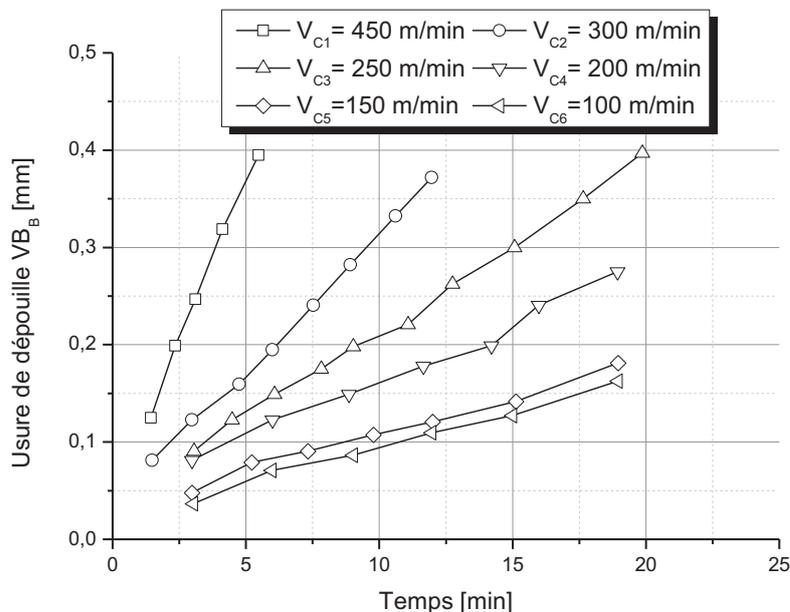


Figure.IV.10. Graphe de l'usure de dépouille VB_B en fonction de temps pour différentes vitesses de coupes V_c .

A partir de la figure IV.10, on peut déterminer le temps d'usure ultime pour chaque régime de coupe V_c , à un critère d'usure de dépouille qu'on prend généralement $VB_B = 0,3$ mm. (Figure IV.11)

La droite qui représente $VB_B = 0,3$ mm = Cst a des points d'intersection avec les courbes $VB_{B1}(T)$, $VB_{B2}(T)$, $VB_{B3}(T)$ et $VB_{B4}(T)$ qui correspondent respectivement aux vitesses V_{C1} , V_{C2} , V_{C3} et V_{C4} . Chaque point d'intersection a respectivement un temps d'usure T_1 , T_2 , T_3 et T_4 .

Les temps T_1 et T_2 sont déterminés par simple interpolation linéaire des courbes $VB_{B1}(T)$ et $VB_{B2}(T)$, le temps T_3 est tiré directement du tableau des données expérimentales (Tableau IV.5) où $T_3 = 15,07$ min et le temps T_4 est déduit par extrapolation linéaire de la courbe $VB_{B4}(T)$. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau IV.6 en matière de temps d'usure T et vitesse de coupe V_c .

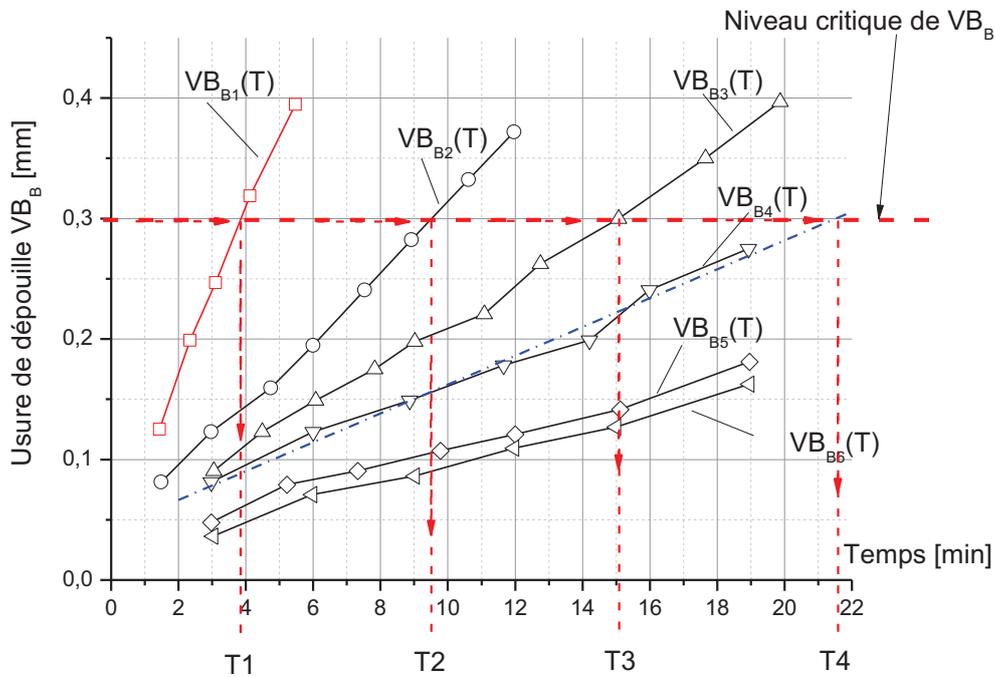


Figure IV.11. Exploitation du graphe pour déterminer les temps d'usure ultimes à $VB_B=0,3$ mm

Tableau IV.6 Temps d'usure à $VB_B=0,3$ mm pour des vitesses variables V_c

Points	V_{Ci}	T_i	$Log V_{Ci}$	$Log T_i$
1	450	3,85	2,65	0,58
2	300	9,55	2,48	0,98
3	250	15,07	2,40	1,18
4	200	21,59	2,30	1,33

Première méthode (Méthode graphique)

Résolution N° 1

Les résultats du tableau IV.6 peuvent être exploitées directement sur Excel pour tracer la courbe $T = f(V_c)$ sur des axes logarithmiques. Ensuite tracer la courbe de tendance et déduire son équation, comme le montre la figure IV.12.

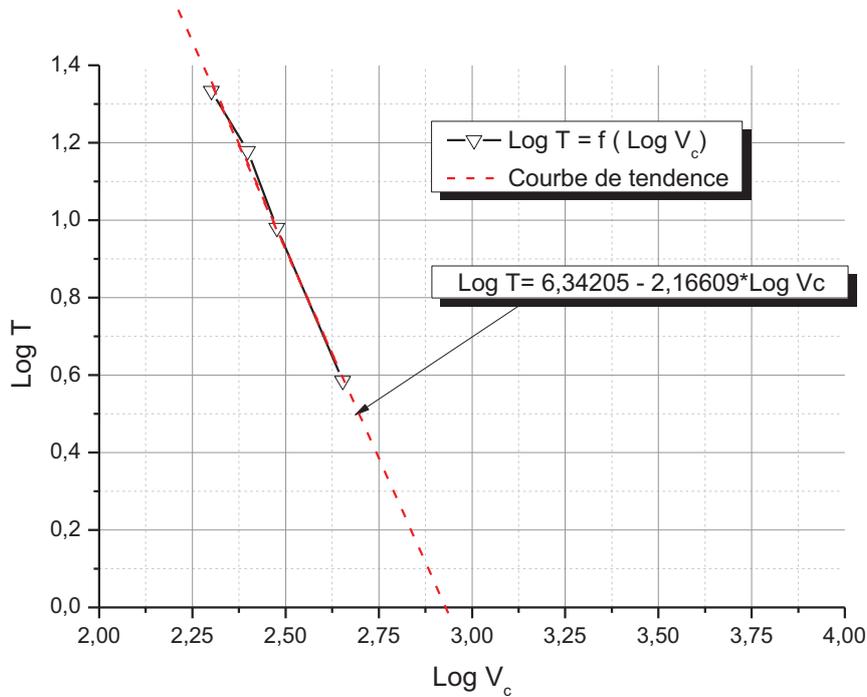


Figure.IV.12. Analyse graphique directe sur Excelle

L'équation de la droite de tendance est de la forme $(y = a \cdot x + b)$. (Figure IV.12)

$$\text{Log } T = 6,34205 - 2,16609 \cdot \text{Log } V_c$$

le modèle de Taylor peut-être écrit sous la forme :

$$\text{Log } T = \text{Log } C_v - n \cdot \text{Log } V_c$$

par similitude on a :

$$\text{Log } C_v = 6,34205 \Rightarrow C_v = 10^{6,34}$$

et

$$n = - 2,16$$

$$\text{on obtient alors : } T = 10^{6,34} \cdot V_c^{-2,16}$$

Résolution N° 2

La loi d'usure de Taylor est définie par :

$$T = C_v V_c^n$$

** Le but de cette résolution est de déterminer les constantes C_v et n

on reprend la même figure VI.12 et on trace une droite passant par les quatre points expérimentaux où la fonction logarithmique $\text{Log } T$ est de la forme $y = a \cdot x + b$

on obtient alors : $\text{Log } T = a \cdot \text{Log } V_c + b$

on a aussi la forme logarithmique de la loi de Taylor est :

$$\text{Log } T = \text{Log } C_v + n \text{Log } V_c$$

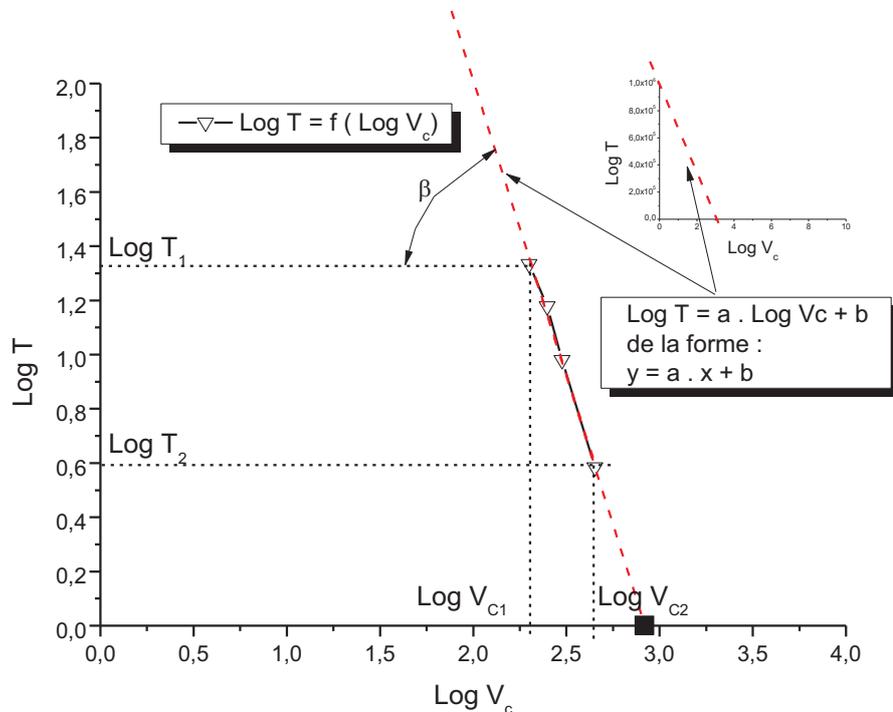


Figure.IV.13. Analyse graphique par détermination de coefficients a et b de la droite.

Où n est la pente qu'on détermine à partir de la courbe linéaire de la figure IV.13, on dispose des points suivants $(\text{Log } V_{c1}, \text{Log } T_1)$ et $(\text{Log } V_{c2}, \text{Log } T_2)$ par exemple $(2.30 ; 1.33)$ et $(2.65 ; 0.58)$.

La pente est donnée par :

$$a = n = \text{tg}\beta = \frac{\text{Log } T_1 - \text{Log } T_2}{\text{Log } V_{c1} - \text{Log } V_{c2}} = \frac{1.33 - 0.58}{2.30 - 2.65} = -2,1428$$

L'intersection avec l'axe des ordonnées (l'axe des vitesses (Ox)) donne le point $(\text{Log}V_{c_0}, 0)$
d'où :

D'une part

$$n = \text{tg}\beta = \frac{\text{Log}T_1 - \text{Log}T_0}{\text{Log}V_{c_1} - \text{Log}V_{c_0}} = \frac{1.33 - 0}{2.30 - \text{Log}V_{c_0}} = -2.1428$$

$$n = -2,1428$$

après calcul

$$\text{Log}V_{c_0} = 2.30 + \frac{1.33}{2.1428} = 2.9206$$

d'autre part,

$$0 = \text{Log}C_v + n \text{Log}V_{c_0}$$

d'où

$$\text{Log}C_v = -n \text{Log}V_{c_0} = 2.1428 \times 2.9206 = 6.2582$$

et

$$C_v = 10^{6.26}$$

et enfin l'équation de Taylor devient : $T = 10^{6.26} \cdot V_c^{-2,14}$

Remarque IV.4

- On peut obtenir cette valeur de même en utilisant le point d'intersection de la courbe linéaire avec l'axe des abscisses (l'axe de temps (Oy));
- La différence entre les résultats la première et la deuxième résolution est due essentiellement à l'erreur de troncature.

Deuxième méthode

Sans passé par le graphe, en utilisant le Tableau IV.6, on peut déduire la formule de Taylor $T = C_v V_c^n$ ou la forme logarithmique linéaire est : $\text{Log}T = \text{Log}C_v + n \text{Log}V_c$

Prenant deux points du tableau

$$\begin{cases} T_1 = 21.59 \text{ min} \\ V_{c_1} = 200 \text{ m/min} \end{cases} \text{ et } \begin{cases} T_2 = 3.85 \text{ min} \\ V_{c_2} = 450 \text{ m/min} \end{cases}$$

En remplaçant dans l'équation (2)

$$\begin{cases} \text{Log}T_1 = \text{Log}C_v + n \text{Log}V_{c_1} \\ \text{Log}T_2 = \text{Log}C_v + n \text{Log}V_{c_2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \text{Log } 21.59 = \text{Log } C_v + n \text{Log } 200 \\ \text{Log } 3.85 = \text{Log } C_v + n \text{Log } 450 \end{cases}$$

après résolution du système on obtient

$$n = \frac{\text{Log } 21.59 - \text{Log } 3.85}{\text{Log } 200 - \text{Log } 450} = -2.1428$$

$$n = -2.1428$$

et

$$\text{Log } C_v = \text{Log } 21.59 + 2.1428 \cdot \text{Log } 200 = 6.2586$$

et

$$C_v = 10^{6.26}$$

et enfin l'équation de Taylor est : $T = 10^{6.26} \cdot V_c^{-2.14}$

TD No 3 : Calcul de la durée de vie d'un outil de coupe**Exo. 01 :**

Calcul de la durée de vie (T) d'un outil de coupe pour V_C , C_V et n connus.

On dispose des valeurs suivantes pour les coefficients de la loi de Taylor : $C_V = 10^{10}$; $n = - 4$.

Question

Calculez la durée de vie d'un outil pour les valeurs suivantes de la vitesse de coupe : $V_c = 50, 100, 150, 200$ m/min.

Exo. 02 :

Calcul de la vitesse de coupe maximale pour T, C_V et n connus.

Suite à une campagne d'essais de durée de vie réalisés en chariotage pour un acier classique de construction mécanique on a trouvé les paramètres suivants de la loi de Taylor :

$$C_V = 9,13.10^9 ; n = - 3,87.$$

Question

Quelle doit être la vitesse de coupe maximale pour que l'on ait au moins $T = 15$ min ?

Exo. 03 :

Calcul du C_V pour V_C , T et n connus.

Des essais de durée de vie d'outil ont donné $T = 14$ min, $V_c = 213$ m/min et $n = -3,45$.

Question

Quelle est la valeur du coefficient C_V de la loi de Taylor ?

Exo 4 :

Calcul de n pour T, C_V et V_C connus.

Des essais de durée de vie ont donné les paramètres $T = 13$ min, $C_V = 7.10^{11}$, $V_c = 300$ m/min.

Question

Quelle est la valeur de n ?

Exo .05 :

Calcul des paramètres de la loi de Taylor pour deux essais à T, et V_c connus

Un ouvrage indique que pour $V_c = 400$ m/min, l'outil dure 15 min.

Des essais ont indiqué que pour $V_c = 200$ m/min, l'outil dure 150 min.

Question

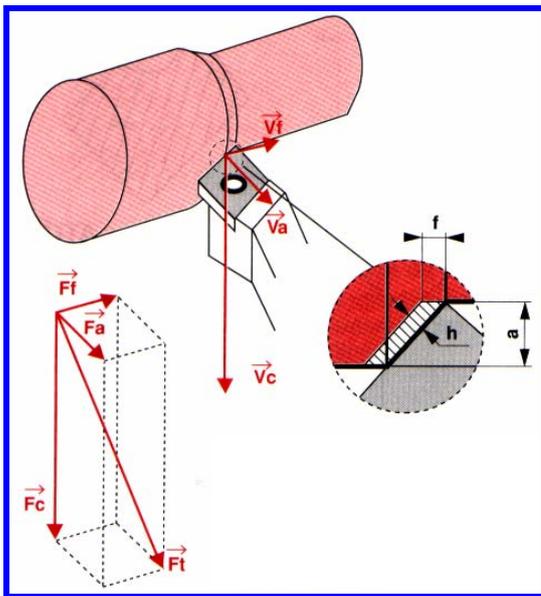
Quelles sont les valeurs de C_v et de n ? Combien durera l'outil pour une vitesse de coupe de 300 m/min ?

Efforts et puissance de coupe

1. EFFORTS DE COUPE

L'étude et l'approximation des efforts de coupe sont nécessaires pour **choisir les outils** et **dimensionner le porte pièce**; leurs directions permettent de déterminer le sens de déplacement des outils afin **que les appuis du montage s'opposent à ces efforts**.

A - CAS DU TOURNAGE :



L'effort de coupe F_t exercé par la pièce sur l'outil admet trois composantes :

- ✓ F_c : effort tangentiel de coupe dû au mouvement de coupe.
- ✓ F_t : effort tangentiel d'avancement dû au mouvement d'avance.
- ✓ F_a : effort radial dû à la profondeur de passe.

La composante la plus importante est F_c .

Cet effort s'exprime par la relation :

$$F_c = K_c \cdot a \cdot f$$

\swarrow \swarrow \swarrow \swarrow
 daN daN/mm² mm mm/tr

- ✓ K_c : pression spécifique de coupe fonction de l'épaisseur du copeau (h) et du matériau usiné.
- ✓ a : valeur de la profondeur de passe.
- ✓ f : valeur de l'avance.

Matières	K_c en daN/mm ²			
	Épaisseur de copeau			
	0,1	0,2	0,4	0,8
E 26	360	260	190	140
E 36	400	290	210	150
A 60	420	300	220	160
XC 38 – XC 42	320	230	170	125
XC 70	390	285	205	150
Acier Inox	520	375	270	190
Ft10 - Ft15	190	136	100	70
Ft20 – Ft25	290	210	150	110
Fontes alliées	325	230	170	120
Fontes malléables	240	175	125	9
Laiton 160		115	85	60
Bronze 340		245	180	130
Alliage alu Rr < 19	115	85	60	45
Alliage alu 19 < Rr < 27	140	100	70	50

Exercice :

Soit une opération de chariotage avec un outil couteau sur un axe en Ft10 (diamètre brut : 100 mm, diamètre usiné : 96 mm).

L'usinage se fera dans les conditions suivantes :

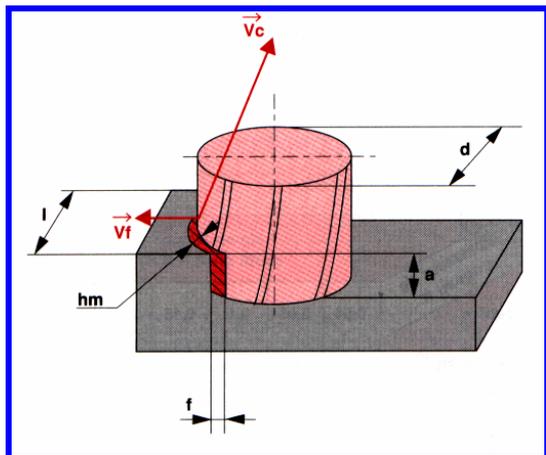
$$V_c = 20 \text{ m/min}$$

$$f = 0,4 \text{ mm/tr}$$

$$K_c = 100 \text{ daN/mm}^2$$

$$F_c = 100 \times 2 \times 0,4 = 80 \text{ daN}$$

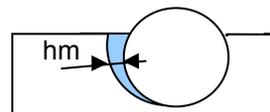
B - CAS DU FRAISAGE :



L'effort tangentiel par dent, dû à V_c , est donné par la même formule qu'en tournage.

Seule la démarche de recherche de la valeur de K_c change.

(L'épaisseur du copeau varie ; donc on détermine h_m)

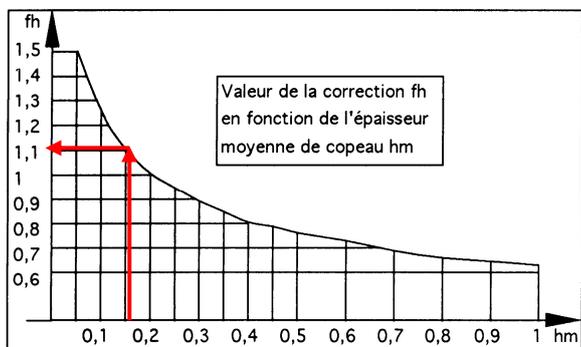


Exercice :

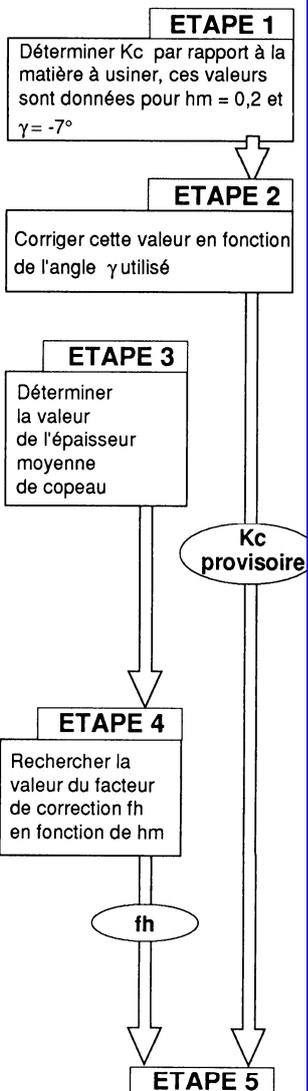
Matière	K_c	Matière	K_c	Matière	K_c	Matière	K_c
XC10	275	Z200C12	350	10NC6	320	Ft20	140
XC35	300	Z85W	410	35CD4	390	Ft40	180
XC80	330	Z8C17	320	FGS 400	150	MP 60-3	200
A70	260	90MV8	675	FGS 700	225	Alliage Alu.	95

K_c est modifié de 1,5 % par degré de changement d'angle de coupe. Un angle de coupe plus grand (positif) donne un K_c réduit et inversement ($\gamma = +3^\circ$ donne un K_c de 15% inférieur à la valeur du tableau).

a_r / D	Épaisseur moyenne de copeau h_m en mm								
	Avance par dent en mm								
	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1
1 / 10	0,05	0,1	0,19	0,29	0,38	0,48	0,58	0,77	0,96
2 / 10	0,05	0,1	0,19	0,29	0,38	0,48	0,57	0,76	0,95
3 / 10	0,05	0,09	0,19	0,28	0,38	0,47	0,56	0,75	0,94
4 / 10	0,05	0,09	0,19	0,28	0,37	0,47	0,56	0,74	0,93
1 / 2	0,05	0,09	0,18	0,28	0,37	0,46	0,55	0,74	0,92
6 / 10	0,04	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,53	0,71	0,89
7 / 10	0,04	0,09	0,17	0,26	0,35	0,43	0,52	0,70	0,87
8 / 10	0,04	0,08	0,16	0,25	0,33	0,41	0,49	0,66	0,82
9 / 10	0,04	0,08	0,15	0,23	0,31	0,39	0,46	0,62	0,77
1	0,03	0,07	0,12	0,18	0,24	0,31	0,37	0,49	0,61



Calculer la valeur du coefficient spécifique de coupe pour l'opération considérée en appliquant la formule : $K_c = K_c(\text{provisoire}) \cdot f_h$



Soit un fraisage à effectuer sur une pièce en A70 de largeur $a_r = 80 \text{ mm}$ avec une fraise de diamètre :

100 mm (8 dents).

$V_c = 20 \text{ m/min}$

L'angle de coupe γ est de -1° ,

l'avance est de

$0,2 \text{ mm/dent/tr}$,

la pénétration est de 1 mm

Étape 1 :

$K_c = 260 \text{ daN/mm}^2$

Étape 2 :

$\gamma = -1^\circ$

6° d'écart (plus grand)

$K_c(\text{provisoire}) =$

$260 - (260 \times 9/100) =$

$236,6 \text{ daN/mm}^2$

Étape 3 :

$a_r/D = 80 / 100 = 0,8$

$f = 0,2 \text{ mm/dent/tr}$

$h_m = 0,16 \text{ mm}$

Étape 4 :

$f_h = 1,1$

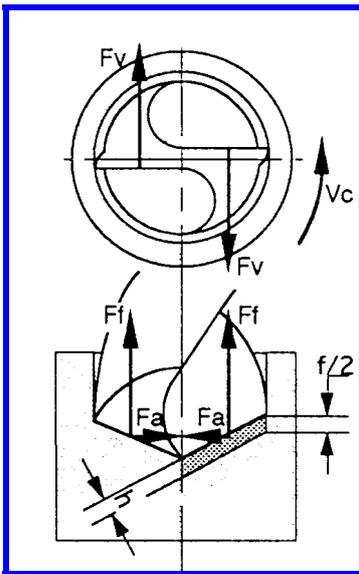
Étape 5 :

$K_c = 236,6 \times 1,1 =$

$260,26 \text{ daN/mm}^2$

$F_c = 260,26 \times 1 \times 0,2 = 52,052 \text{ daN}$

C - CAS DU PERCAGE :



Le schéma ci-contre donne une représentation de la situation des efforts s'exerçant sur chacune des arêtes.

On peut **s'apercevoir de l'importance d'un bon affûtage** : en effet une dissymétrie des arêtes provoquerait **un écart entre les efforts Fa sur chacune d'elles et par là même une déviation de la trajectoire.**

Pour les utilisations courantes, **les faibles puissances mises en jeu ne justifient pas de calcul.**

2. PUISSANCE DE COUPE

On distingue deux puissances :

✓ LA PUISSANCE DE COUPE (P_c) :

Elle dépend principalement de **la vitesse de coupe (V_c) et de l'effort tangentiel de coupe (F_c).**

✓ LA PUISSANCE AU MOTEUR (P_m)

Elle est fonction **du rendement de la chaîne cinématique.**

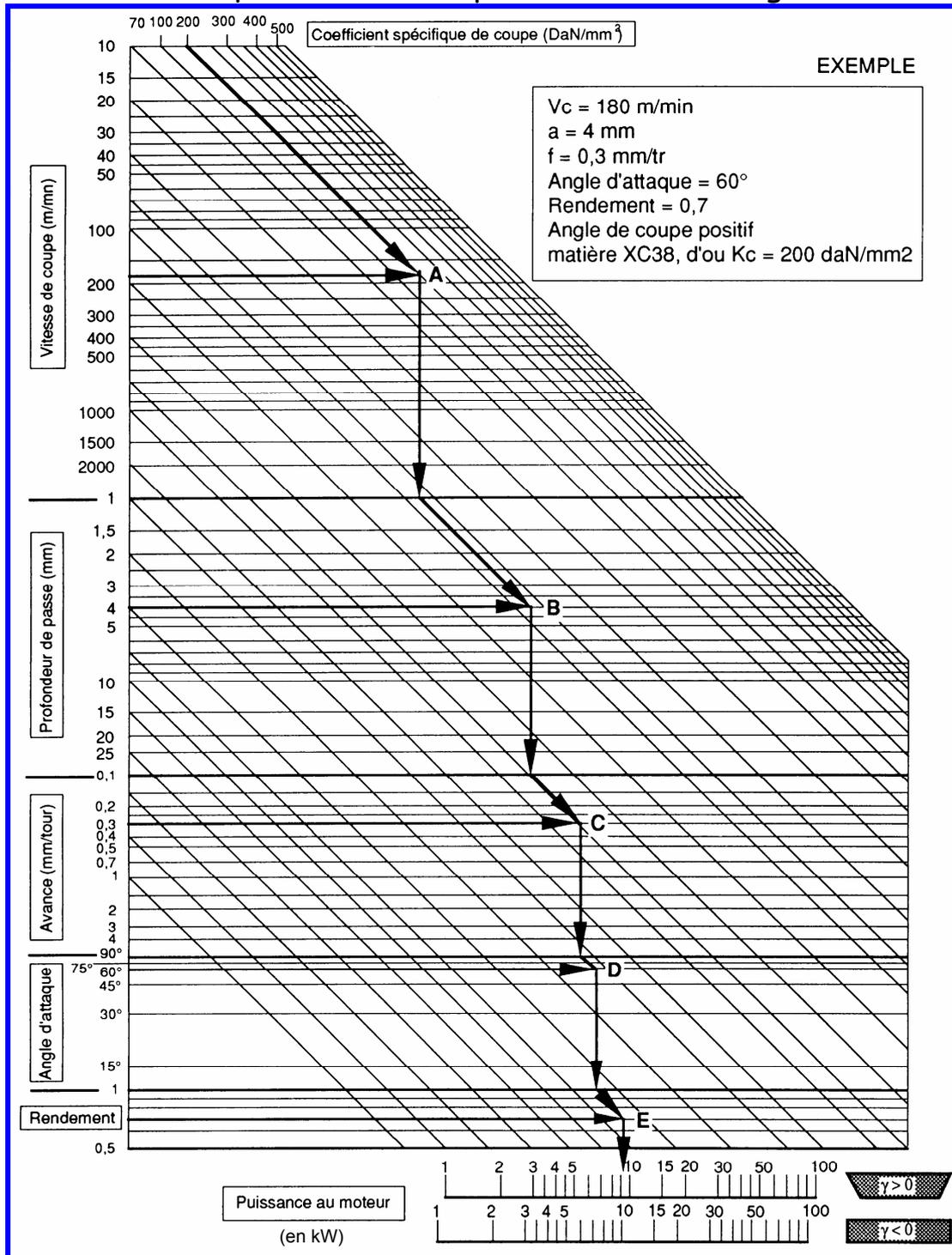
$$P_m = \frac{P_c}{\eta}$$

Les deux diagrammes proposés ci-après permettent de déterminer :

- ✓ soit la puissance de la machine si les paramètres de coupe sont déjà déterminés
- ✓ soit un des paramètres si la machine est imposée.

A - CAS DU TOURNAGE :

Abaque de calcul de puissance en tournage



Exercice :

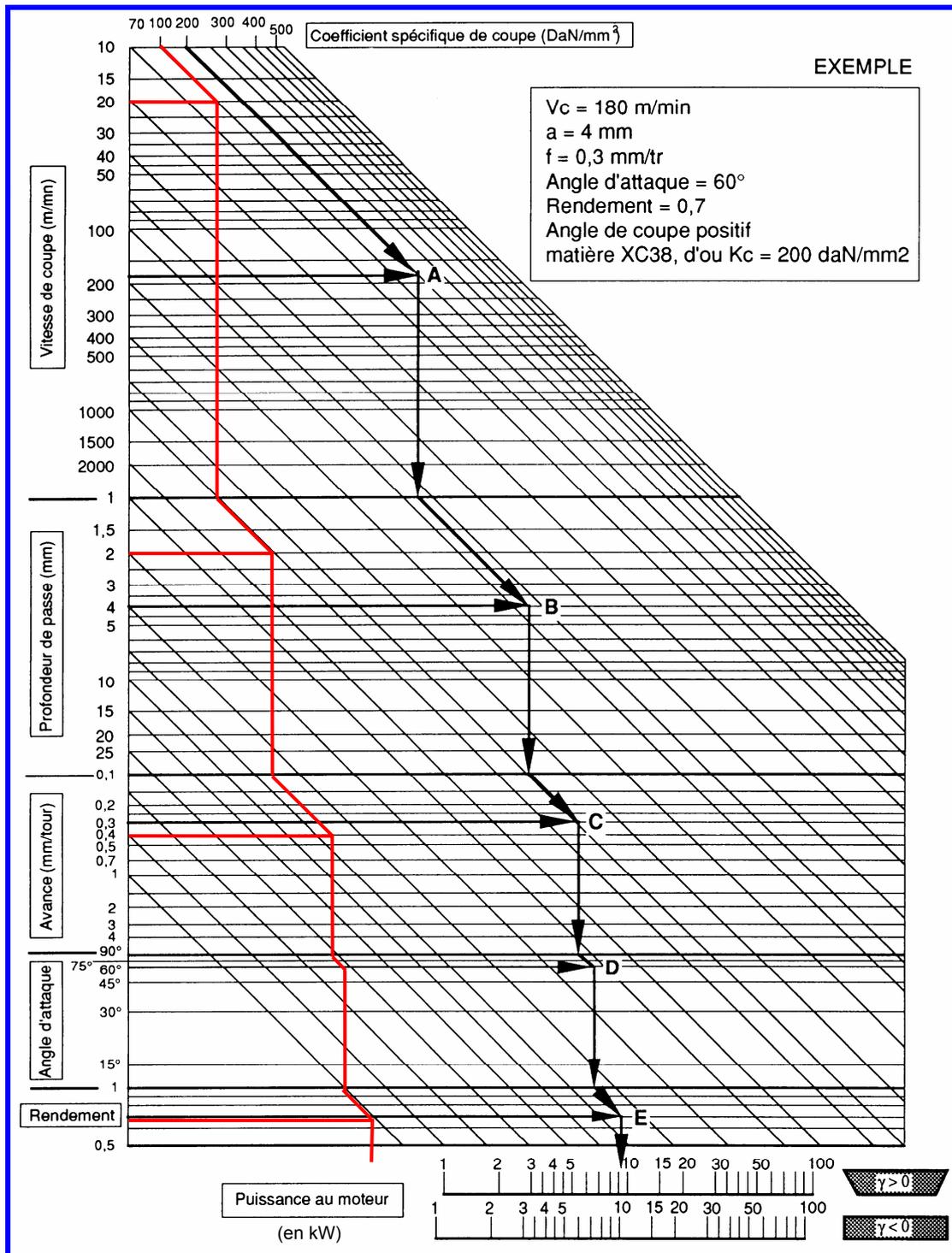
En utilisant les données et résultats de l'exemple ci-dessus et les renseignements suivants :

- ✓ Angle d'attaque : 90°
- ✓ Rendement $0,7$
- ✓ $\gamma > 0$

Reproduire la démarche de l'exemple.

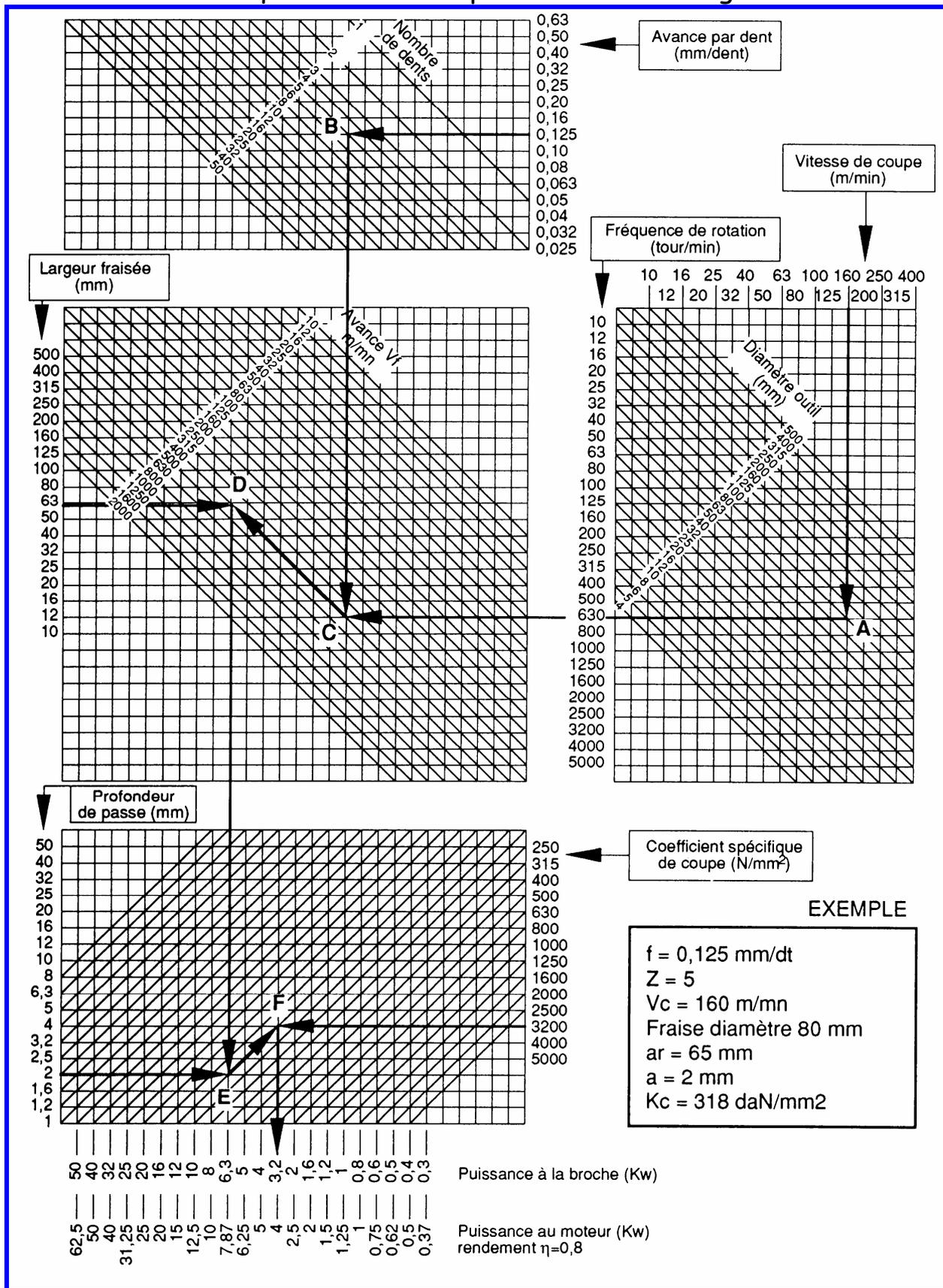
Exercice :

- ✓ $a = 2 \text{ mm}$
- ✓ $f = 0,4 \text{ mm/tr}$
- ✓ $V_c = 20 \text{ m/min}$
- ✓ $K_c = 100 \text{ daN/mm}^2$
- ✓ Angle d'attaque : 90°
- ✓ Rendement : $0,7$
- ✓ $\gamma < 0$



B - CAS DU FRAISAGE :

Abaque de calcul de puissance en fraisage



Exercice :

$K_c = 260 \text{ daN/mm}^2$

$a_r = 80 \text{ mm}$

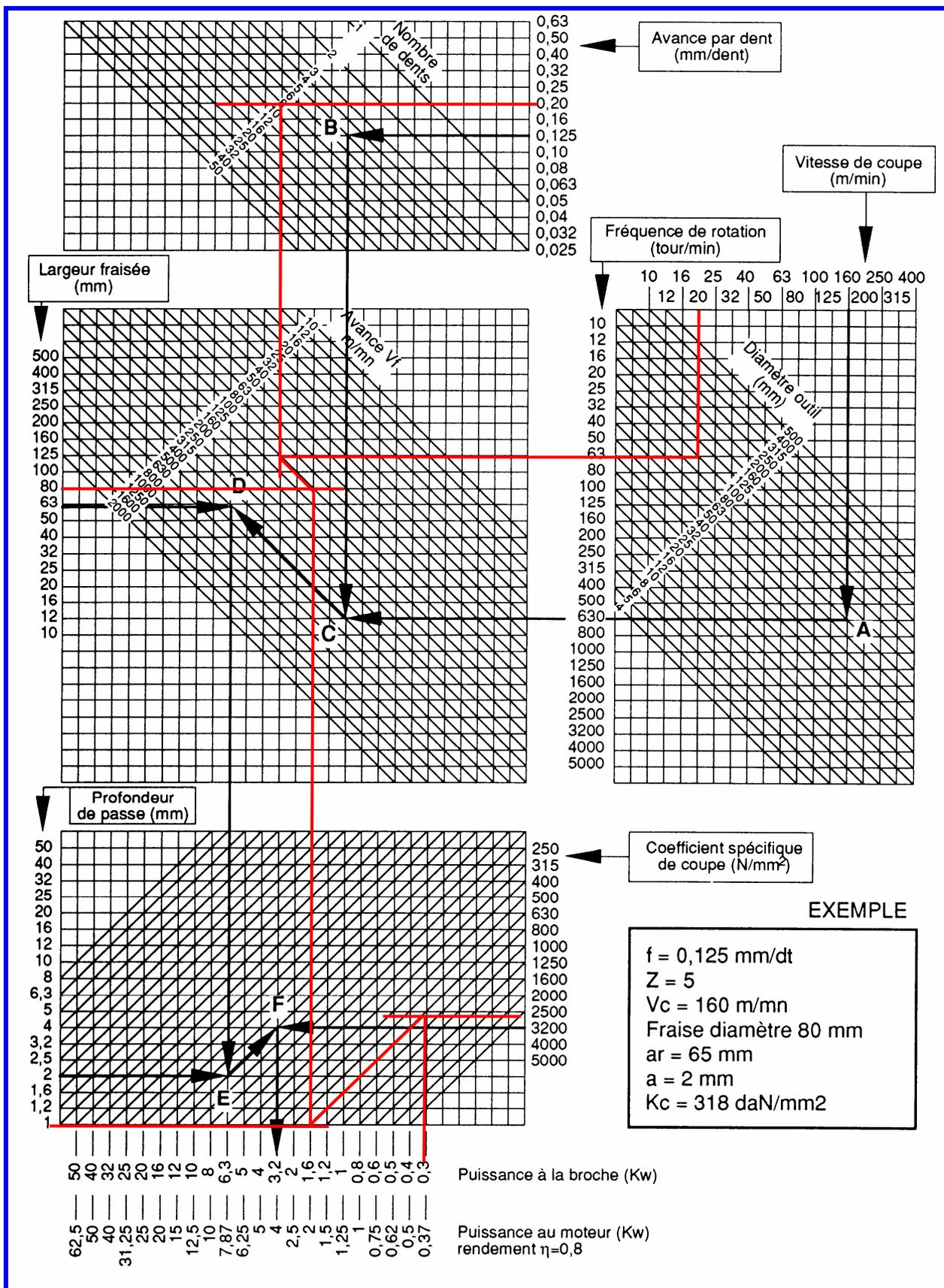
$V_c = 20 \text{ m/min}$

fraise de diamètre : 100 mm (8 dents)

angle de coupe γ est de -1°

l'avance de $0,2 \text{ mm/dent/tr}$

pénétration est de 1 mm



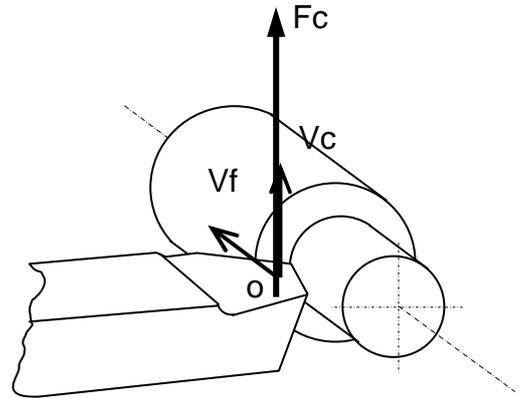
CHAPITRE IV : Le couple outil-matière

Pr B. Benmohammed Master I-FMP

1- Puissance de coupe en usinage :

L'étude et l'évaluation des forces de coupe présente un intérêt en usinage principalement :

- pour dimensionner les **outils** et les **éléments** de machine outils ;
- pour maîtriser l'apparition des **vibrations** (broutage) ;
- pour évaluer la **puissance de coupe** et permettre ainsi le choix rationnel d'une machine outil.



Cette puissance de coupe absorbée par la broche, se détermine à l'aide d'une formule qui tient compte :

- des paramètres de coupe en fonction de la **matière** à usiner,
- des forces de coupe de l'outil sur la pièce au travers d'une variable **kc** appelée "**Pression spécifique de coupe**" :

$$k_c = \frac{F_c}{A_D}$$

$\frac{N/mm^2}{N/mm^2}$

k_c : pression spécifique de coupe

F_c : Force de coupe

A_D : Section du copeau

Remarque : k_c représente donc une force de coupe par unité de surface.

Il existe des banques de données qui permettent de déterminer à l'aide d'un tableau, la valeur de k_c à prendre, en fonction de la matière à usiner, de sa résistance à la traction (dureté Brinell) et de l'épaisseur du copeau, pour des outils carbures.

La formule générale de la **puissance de coupe** P_c peut s'écrire :

La puissance de coupe est exprimée en kiloWatt

$$P_c = \frac{A_D \times k_c \times V_c}{60 \cdot 10^3}$$

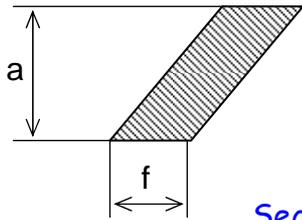
$\frac{mm^2 \cdot N/mm^2 \cdot m/min}{kW}$

À l'aide des abaques de calcul de puissance en tournage comme en fraisage (page 4 et 5), il est possible de déterminer P_c en fonction des données pour un usinage (paramètres de coupe, outil utilisé, matière usinée, machine).

Ces abaques sont des outils permettant de s'affranchir de la formule de calcul de puissance de coupe.

2- Puissance de coupe en tournage absorbée par la broche :

Si l'on considère la section de copeau :



Section du copeau

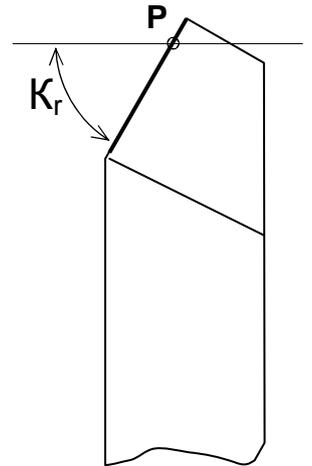
La section du copeau s'écrit :

$$A_D = f \times a$$

Avance

Profondeur de passe

Pour un outil donné :



La formule de la puissance de coupe peut s'écrire :

$$P_c = \frac{f \times a \times k_c \times V_c}{60 \cdot 10^3}$$

mm/tr mm N/mm² m/min

kW

En BEP, nous utiliserons l'abaque de calcul de puissance de coupe de tournage (page 4), pour déterminer P_c .

ATTENTION : L'unité de k_c sur l'abaque de la pages 4, est exprimée en daN/mm^2 !

Exemple : Usinage d'un arbre de scie en ébauche.

Données : $\varnothing 50\text{mm}$

- Matière usinée C48 pour une pression spécifique de coupe $k_c = 2500 \text{ N/mm}^2$
- Profondeur de passe $a = 4\text{mm}$
- Vitesse de coupe $V_c = 160\text{m/min}$
- Avance $f = 0,4\text{mm/tr}$
- Outil PSBN ($K_r = 75^\circ$) à coupe négative
- Machine outil utilisée : tour parallèle conventionnel, rendement $\eta = 0,6$

Question : A l'aide de l'abaque de puissance de coupe en tournage, déterminer la puissance consommée par le moteur pour réaliser cet usinage.

Réponse : $P_c = 16 \text{ kW}$

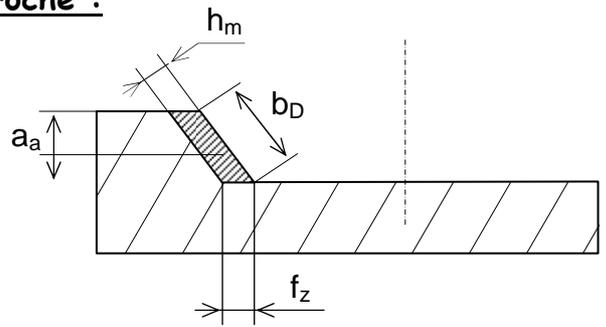
3- Puissance de coupe en fraisage absorbée par la broche :

Illustration d'une dent en prise :

La section du copeau moyen peut s'écrire :

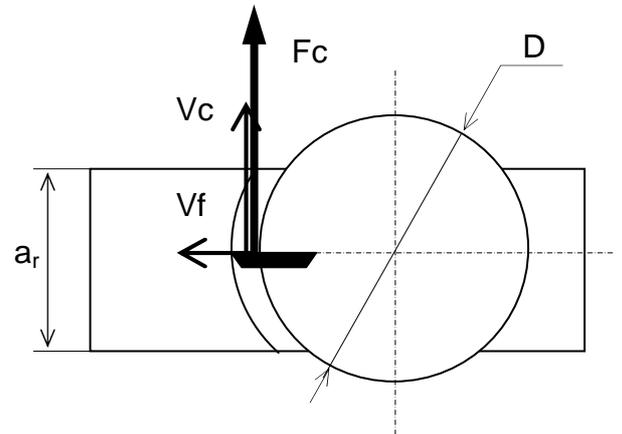
$$A_{Dm} = h_m \cdot b_D$$

La puissance développée par F_c peut s'écrire :
Avec Z' : nombre de dents en prise.



$$P_c = \frac{A_{Dm} \times k_c \times V_c \times Z'}{60 \cdot 10^3}$$

mm^2 (for A_{Dm}), N/mm^2 (for k_c), m/min (for V_c), $dents$ (for Z')
 kW (for P_c)



Il est alors possible d'en déduire la formule de la puissance de coupe à la broche :

$$P_c = \frac{a_a \times a_r \times f_z \times Z' \times k_c \times V_c}{\pi \cdot D \cdot 60 \cdot 10^3}$$

mm (for a_a), mm (for a_r), $mm/tr/dent$ (for f_z), $dents$ (for Z'), N/mm^2 (for k_c), m/min (for V_c)
 kW (for P_c), mm (for D)

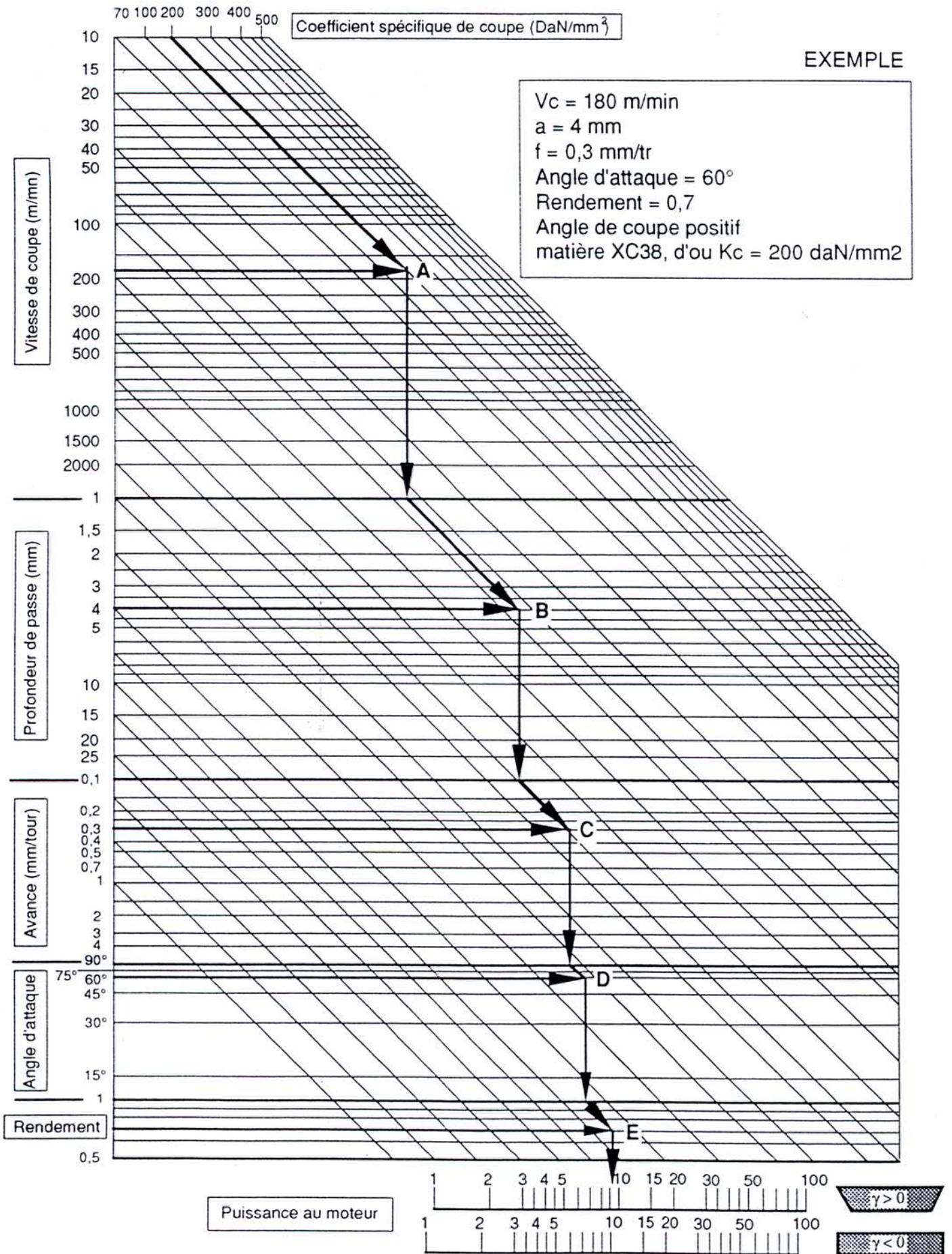
En BEP, nous utiliserons l'abaque de calcul de puissance de coupe de fraisage (page 5), pour déterminer P_c .

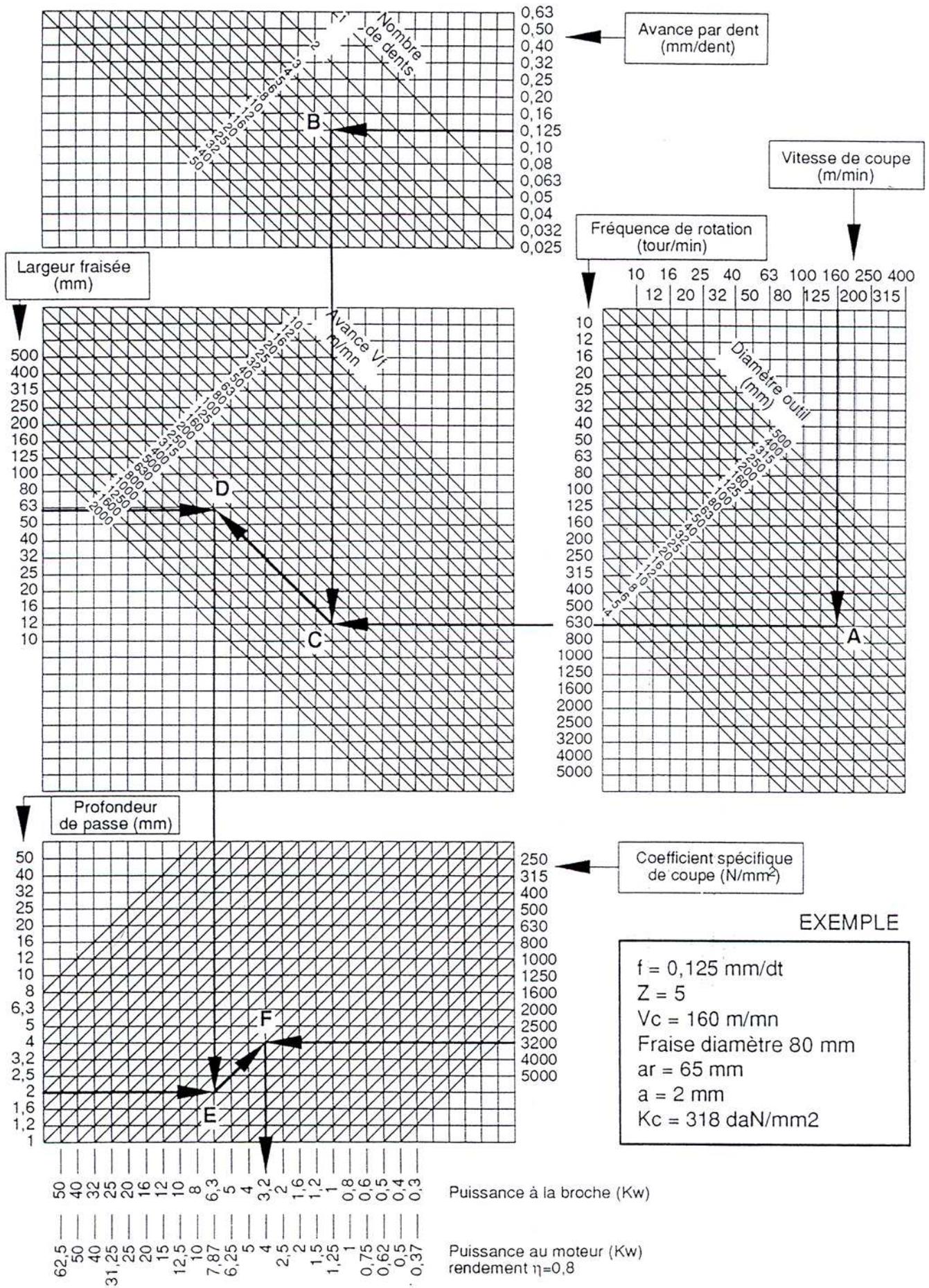
Exemple : Usinage d'un guide lame en ébauche

Données : Matière usinée **C38** pour une pression spécifique de coupe $k_c = 2533 \text{ N/mm}^2$
 Largeur fraisée $a_r = 105 \text{ mm}$ et profondeur de passe $a_a = 3 \text{ mm}$
 Vitesse de coupe $V_c = 100 \text{ m/min}$
 Fraise tourteau à plaquettes carbures $\varnothing 125$
 Avance $f_z = 0,3 \text{ mm/tr}$
 Nombre de dents $Z = 8$
 Rendement du moteur de : $\eta = 0,8$

Question : A l'aide de l'abaque de puissance de coupe en fraisage, déterminer la puissance consommée par le moteur pour réaliser cet usinage.

Réponse : $P_c = 12,5 \text{ kW}$





EXEMPLE

$f = 0,125 \text{ mm/dt}$
 $Z = 5$
 $V_c = 160 \text{ m/mn}$
 Fraise diamètre 80 mm
 $a_r = 65 \text{ mm}$
 $a = 2 \text{ mm}$
 $K_c = 318 \text{ daN/mm}^2$

TD no. : 04 - Forces et puissances de coupe

Rappel de cours :

Cas du tournage (cylindrage)

Efforts de coupe (F_c)

Dans le cas d'un outil à chariotier (ci-contre), l'effort radial F_a est nul (pas d'avance radiale). De plus, la vitesse d'avance V_f est en général 1000 fois plus petite que la vitesse de coupe. On peut donc négliger F_f devant F_c .

L'effort de coupe est : $F_c = K_c \cdot a \cdot f$
avec

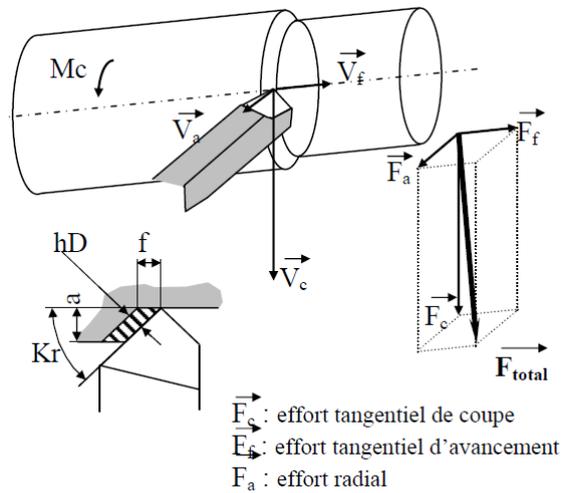
F_c : Force de coupe en N

K_c : Pression spécifique de coupe (fonction de hD et du matériau usiné) en N/mm^2

a : profondeur de passe en mm

f : valeur de l'avance en mm/tr

$hD = f \cdot \sin(Kr)$



Puissance nécessaire à la coupe (P_c)

Calcul de la puissance : cas général ($P = \vec{F} \cdot \vec{V}$). (\vec{V} en m/s et \vec{F} en N)

$$P = \begin{vmatrix} F_a \\ F_f \\ F_c \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} V_a \\ V_f \\ V_c \end{vmatrix} = F_a \cdot V_a + F_f \cdot V_f + F_c \cdot V_c \rightarrow P_c = F_c \cdot V_c \rightarrow P_c = K_c \cdot a \cdot f \cdot V_c / 60$$

avec

P_c : Puissance nécessaire de coupe en W

K_c : Pression spécifique de coupe (fonction de hD et du matériau usiné) en N/mm^2

a : profondeur de passe en mm

f : valeur de l'avance en mm/tr

V_c : vitesse de coupe en m/min

K_c en N/mm^2 (outil carbure et $Kr=75^\circ$)				
Matière	$hD=0,1$	$hD=0,2$	$hD=0,4$	$hD=0,8$
E335(A60)	4200	3000	2200	1550
C35 C45 (XC38-XC48)	3700	2800	2050	1500
C65 (XC65) Acier inox	4700	3400	2500	1800
Fonte Ft20	2900	2080	1500	1080
Fonte GS	3350	2500	1800	1300
Laiton	1400	1000	750	550
Bronze	3250	2400	1750	1300
Alu	1400	1000	700	520

Exercice no. 01 :

Calculez la puissance de coupe en tournage pour les données suivantes :

Matière= C45, $a=4$ mm, $V_c=160$ m/min, $f = 0.4$ mm/tr, outil carbure $Kr=75^\circ$.

Rappel de cours :

Cas du fraisage (en bout)

Efforts de coupe par dent (F_c)

L'effort d'avancement étant négligeable (devant F_c)

l'effort de coupe pour une dent est le suivant : $F_c = K_c \cdot a \cdot f$

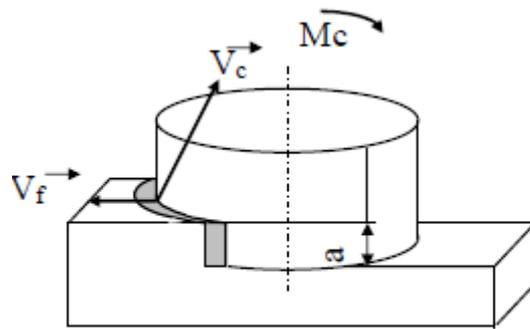
avec

F_c : Force de coupe en N

K_c : Pression spécifique de coupe (fonction de h_m et du matériau usiné) en N/mm^2

a : profondeur de passe en mm

f : valeur de l'avance en mm/tr/dent



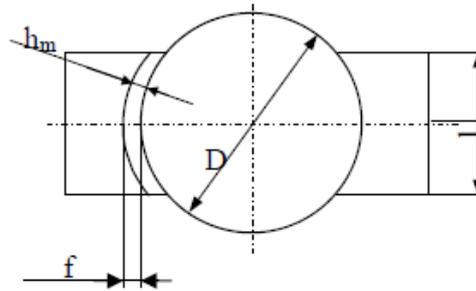
Puissance nécessaire à la coupe (P_c)

Comme pour le tournage, les efforts F_a et F_f sont négligés, ce qui donne la formule suivante (pour la fraise entière) :

$P_c = K_c \cdot Q$ (Q : débit de copeaux en mm^3/s)

et $Q = l \cdot a \cdot V_f / 60 = l \cdot a \cdot f \cdot Z \cdot n / 60 = l \cdot a \cdot f \cdot Z \cdot V_c / (\pi \cdot D \cdot 60)$

$$P_c = \frac{K_c \cdot l \cdot a \cdot f \cdot Z \cdot V_c}{\pi \cdot D \cdot 60}$$



P_c : Puissance nécessaire de coupe en W

K_c : Pression spécifique de coupe (fonction de h_m et de la matière) en N/mm^2

(Rem : Si $K_r \neq 75^\circ \rightarrow$

$h_m = 1,04 \cdot \sin K_r \cdot h_{m75^\circ}$)

l : largeur de coupe

a : profondeur de passe en mm

f : valeur de l'avance en mm/tr

Z : nombre de dents

V_c : vitesse de coupe en m/min

D : diamètre de la fraise (en mm)

h_m en mm (fraise centrée et $K_r=75^\circ$)									
l/\emptyset	$f=0,05$	$f=0,1$	$f=0,2$	$f=0,3$	$f=0,4$	$f=0,5$	$f=0,6$	$f=0,8$	$f=1,0$
0,1	0,05	0,1	0,19	0,29	0,38	0,48	0,58	0,77	0,96
0,2	0,05	0,1	0,19	0,28	0,38	0,48	0,57	0,76	0,95
0,3	0,05	0,09	0,19	0,28	0,38	0,47	0,56	0,75	0,94
0,4	0,05	0,09	0,19	0,28	0,37	0,47	0,56	0,74	0,93
0,5	0,05	0,09	0,18	0,28	0,37	0,46	0,55	0,74	0,92
0,6	0,04	0,09	0,18	0,27	0,36	0,44	0,53	0,71	0,89
0,7	0,04	0,09	0,17	0,26	0,35	0,43	0,52	0,70	0,87
0,8	0,04	0,08	0,16	0,25	0,33	0,41	0,49	0,66	0,82
0,9	0,04	0,08	0,15	0,23	0,31	0,39	0,46	0,65	0,77
1,0	0,03	0,07	0,12	0,18	0,24	0,31	0,37	0,49	0,61

K_c en N/mm^2 (outil carbure et $K_r=75^\circ$)						
Matière	$h_m=0,1$	$h_m=0,2$	$h_m=0,4$	$h_m=0,6$	$h_m=0,8$	$h_m=1,0$
E335(A60)	3280	2690	2250	1950	1810	1700
C35 C45 (XC38-XC48)	3250	2650	2180	1910	1780	1670
C65 (XC65)	3040	2570	2180	1950	1850	1750
Acier inox	3860	3240	2720	2430	2300	2170
Fonte Ft20	1930	1620	1360	1220	1150	1090
Fonte GS	2140	1800	1510	1350	1280	1200
Alu	1080	950	810	700	670	600

Exercice no. 02 :

Calculez la puissance de coupe en fraisage pour les données suivantes :

Matière XC38, $l=100$ mm, $a=5$ mm, $V_c=115$ m/min, $f=0,3$ mm/tr/dt, fraise carbure $\emptyset 125$ mm, $Z=8$ dents et $K_r=75^\circ$. NB : Retrouvez : h_m , K_c et calculez P_c .

Rappel de cours :

Cas du perçage

Efforts de coupe (F_c)

F_{1f} et F_{2f} sont négligeables (devant F_{1c} et F_{2c}) et F_{1a} et F_{2a} sont égales et opposées (en théorie).

De plus l'avance f fournie par les abaques de perçage est pour les 2 dents du foret. $f_{\text{réel}}$ pour une dent = $f/2$

$$\rightarrow F_c = \boxed{K_c \cdot D / 4}$$

avec

F_c : Force de coupe en N

K_c : Pression spécifique de coupe (fonction de h et de la matière) en N/mm^2

f : valeur de l'avance en mm/tr

D : Diamètre du perçage en mm

Remarque : Pour le cas d'un avant trou, le diamètre de perçage D est remplacé par $(D-d)$ où d représente le diamètre de l'avant trou

Puissance nécessaire à la coupe (P_c)

Calcul de la puissance : cas général ($P = \vec{F} \cdot \vec{V}$). (\vec{V} en m/s et \vec{F} en N)

La formule est la suivante :

$$P_c = F_c \cdot V_c \rightarrow P_c = \boxed{K_c \cdot D \cdot V_c / (4 \cdot 60)}$$

avec

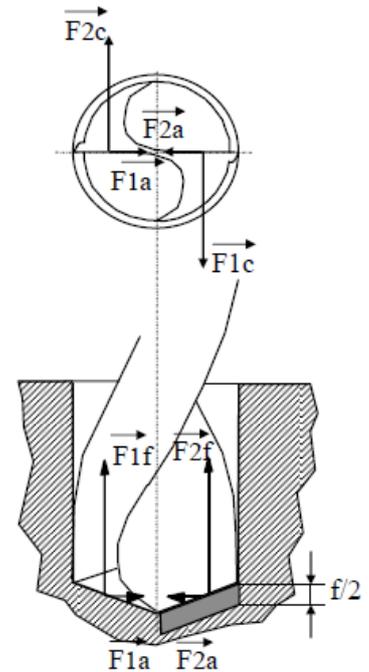
P_c : Puissance nécessaire de coupe en W

K_c : Pression spécifique de coupe (fonction de h et de la matière) en N/mm^2

f : valeur de l'avance en mm/tr

D : diamètre de perçage en mm

V_c : vitesse de coupe en m/min



K_c en N/mm^2 (pour outil ARS à 120°)

Matière	$h=0,04$	$h=0,06$	$h=0,1$	$h=0,16$	$h=0,25$	$h=0,4$
E335(A60)	3400	2950	2600	2250	1970	1710
C35 C45 (XC38-XC48)	3550	3050	2640	2270	1950	1680
C65 (XC65)	3000	2710	2450	2200	2000	1800
Acier inox	2400	2300	2100	1960	1820	1680
Fonte Ft20	2650	2320	2010	1760	1530	1340
Fonte GS	2810	2500	2160	1890	1650	1450
Alu	1170	1040	900	790	680	610

Exercice no. 03 :

Calculez la puissance de coupe en perçage pour les données suivantes :

Matière= A60, $V_c=60$ m/min, $f = 0,2$ mm/tr, foret $\varnothing 20$ mm en ARS à 120° .

Rappel de cours :

Puissance absorbée (P_m)

Cette puissance sera en fonction du rendement de la machine. $P_m = \boxed{P_c / \eta}$

Les machines traditionnelles (à engrenages) ont un rendement moyen $\eta=0,6$ et les CN (moteurs à courant continu) ont un rendement moyen de 0,9

Exercice no. 04 :

Calculez la puissance nécessaire de la machine pour les exercices 1,2 et 3.

Chapitre 5:

Les paramètres de coupe

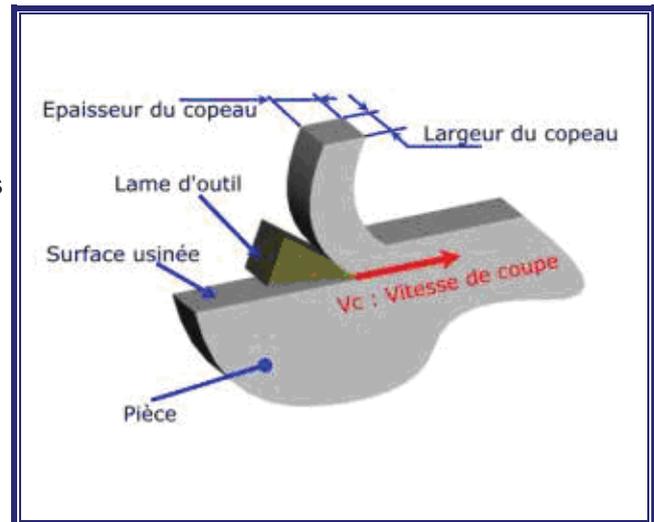
1. Principe

Lors d'un usinage par enlèvement de matière, on se retrouve, dans la majorité des cas, dans la configuration suivante :

Une lame d'outil pénètre dans la matière et enlève un copeau.

L'outil suit une trajectoire par rapport à la pièce à usiner. Ces mouvements sont assurés par les éléments constitutifs de la machine outil.

Pour obtenir un travail satisfaisant (bon état de la surface usinée, rapidité de l'usinage, usure modérée de l'outil, ...) on doit régler les paramètres de la coupe.

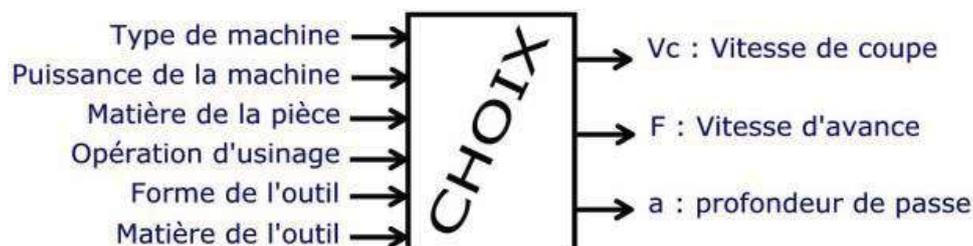


Il y a plusieurs critères qui permettent de définir les paramètres de la coupe, notamment :

- le type de machine (tournage, fraisage, perçage) ;
- la puissance de la machine ;
- la matière usinée (acier, aluminium) ;
- la matière de l'outil (ARS, carbure) ;
- le type de l'opération (perçage, chariotage, surfaçage).

L'objectif final est d'obtenir une pièce usinée dans de bonnes conditions. Pour cela il faut déterminer certains paramètres spécifiques :

- la vitesse de coupe : V_c ;
- la vitesse d'avance : F ;
- la profondeur de passe : a .



2. Explications des critères de choix

Tous ces critères sont intimement liés.

■ Type de machine

Suivant le type d'opération à réaliser, il faut choisir la méthode d'usinage, et donc choisir la machine à utiliser. Donc il faut choisir entre tournage, fraisage ou perçage. Naturellement il y a souvent plusieurs possibilités pour réaliser un même type d'usinage.

■ Puissance de la machine

La puissance de la machine influe sur les performances. Pour l'usinage, il y a deux grands cas de figure :

- **Usinage en ébauche** : on cherche à enlever un maximum de matière en un minimum de temps, l'objectif est dans ce cas d'augmenter au maximum le débit de copeaux. Mais la machine doit être suffisamment puissante, ainsi que l'attachement pièce/porte-pièce, sinon la machine peut « caler » ou la pièce peut voler.
- **Usinage en finition** : cette fois, c'est la qualité de réalisation qui est importante. La surface doit être lisse, les cotes doivent être correctes. Comme les efforts en jeu sont plus faibles que pour une ébauche, la puissance de la machine n'est pas un critère primordial.

■ Matière de la pièce

Il est évident que les efforts de coupe ne sont pas les mêmes si vous usinez une pièce en polystyrène ou en acier. Donc la matière influe sur des choix relatifs à la puissance machine (entre autre).

■ Opération d'usinage

C'est la même idée que pour le type de machine.

■ Forme de l'outil

C'est la même idée que pour le type de machine.

■ Matière de l'outil

C'est l'outil qui doit usiner la pièce et non l'inverse, donc cela influe sur l'usure de l'outil et sa durée de vie.

3. La vitesse de coupe : V_c [m/min]

Cela correspond au déplacement de l'arête de coupe par rapport à la pièce.

Il ne faut pas confondre V_c et F .

Unité : V_c en m/min.

Dans tout problème d'usinage, il est nécessaire pour des raisons technologiques et économiques de déterminer la valeur de V_c la mieux adaptée au travail à réaliser.

Ces valeurs ont été déterminées expérimentalement par des laboratoires spécialisés dans les essais de coupe.

Le choix de la vitesse de coupe dépend de nombreux paramètres dont les principaux sont :

- la durée de l'outil entre deux affûtages ;
- la nature et l'état du métal à usiner ;
- la nature de l'outil ;
- la lubrification ;
- le mode de travail de l'outil, pour un outil de rabotage travaillant dans les mêmes conditions, on choisira une valeur de V_c plus faible pour limiter les effets néfastes du choc à chaque passe.
- la section du copeau ($S \text{ mm}^2 = f \text{ mm} \times a \text{ mm}$).
 - a : profondeur de passe ;
 - f : avance.

CONCLUSION : Pour faire un choix judicieux de V_c il est nécessaire de tenir compte des paramètres précédents.

Les conditions de coupe imposées dans les tableaux sont données pour une durée de vie d'outil (entre deux affûtages ou rotation de plaquette) de 60 à 90 minutes.

Seuls des essais peuvent permettre de déterminer les conditions de coupe optimales.

La forme des outils influence le choix de la vitesse de coupe.

Les tableaux des vitesses en tournage sont donnés pour l'usinage à l'outil à chariot, pour les autres outils, il faut multiplier la vitesse trouvée par le coefficient k .

Outils	k
à charioter	1
couteau	0,8
à tronçonner	0,5
à aléser	0,7
à fileter	0,3

3.1 Étapes précédant le choix de V_c

- Choisir le matériau de coupe AR ou carbure en fonction essentiellement :
 - du genre de travail = ébauche (Eb), demi-finition (1/2 F), finition (F), retouche ;
 - de la quantité de pièces à usiner ;
 - du matériau à usiner ;
 - de la puissance disponible sur la broche de la machine.
- Choisir a .
- Choisir f en fonction de la rugosité demandée et du rayon de bec r_ϵ .

3.2 Choix de V_c

Les tableaux proposent pour chaque ligne une plage de vitesses utilisables (ex. . tableau 1).

a	f	V_c 60 à 90 min
1 à 4	0,2 à 0,4	60 à 45

Comme base de réglage pour un outil à charioter on peut prendre :

si $a = 4$ $f = 0,4$ $V_c = 45$ m/min
 si $a = 1$ $f = 0,2$ $V_c = 60$ m/min

On remarque et c'est une règle que :

si $a \times f$ augmente, V_c doit diminuer

Les vitesses données (sauf pour les fontes) correspondent à un travail lubrifié.

TABLEAU 1 : Chariotage avec outil en acier rapide
des aciers non alliés et faiblement alliés, et des fontes grises

Aciers		Résistance à la rupture N/mm ²	Conditions de coupe			Outils acier rapide				Tour
			Prof. de passe <i>a</i> (mm)	(Avance) <i>f</i> (min/tr)	<i>V</i> de coupe m/min durée d'outil 60 à 90 mn	Nuance abrégée W-D-V-C	Angle de coupe (degré)	Rayon de bec (mm)	Section du corps de l'outil (mm × mm)	Puissance (kW)
Recuit	< 400°	0,2 à 1	0,1 à 0,2	65 à 60	6-5-2	20°	0,4	12 × 12	< 1	
		1 à 4	0,2 à 0,4	60 à 45			0,8	16 × 16	1 à 4	
		4 à 8	0,4 à 0,8	45 à 30			1,2	25 × 25	4 à 10	
Recuit	400 à 600°	0,2 à 1	0,1 à 0,2	55 à 52	6-5-2	18°	0,4	12 × 12	< 1	
		1 à 4	0,2 à 0,4	52 à 36			0,8	16 × 16	1 à 3	
		4 à 8	0,4 à 0,8	36 à 26			1,2	25 × 25	3 à 5	
Recuit	600 à 750°	0,2 à 1	0,1 à 0,2	50 à 45	6-5-2	14°	0,4	12 × 12	< 1	
		1 à 4	0,2 à 0,4	46 à 30			0,8	16 × 16	1 à 3	
		4 à 8	0,4 à 0,8	30 à 25			1,2	25 × 25	3 à 5	
Trempe revenu	750 à 900°	0,2 à 1	0,1 à 0,2	40 à 35	2-9-1-8	14°	0,4	12 × 12	< 1	
		1 à 4	0,2 à 0,4	35 à 25			0,8	16 × 16	1 à 3	
		4 à 8	0,4 à 0,8	25 à 20			1,2	25 × 25	3 à 5	
Trempe revenu	900 à 1100°	0,2 à 1	0,1 à 0,2	28 à 22	2-9-1-8	14°	0,4	12 × 12	< 1	
		1 à 4	0,2 à 0,4	22 à 17			0,8	16 × 16	1 à 3	
		4 à 8	0,4 à 0,8	17 à 14			1,2	25 × 25	3 à 5	
Fontes	État	Dureté (HB)								
Ft 10-15	Ferritique recuite	< 150°	0,2 à 1	0,1 à 0,2	70 à 65	6-5-2	0°	0,4	12 × 12	< 1
			1 à 4	0,2 à 0,4	65 à 50			0,8	16 × 16	< 2
			4 à 8	0,4 à 0,8	50 à 35			1,2	25 × 25	2 à 6
Ft 20	Perlite ferrite moulée	160 à 200°	0,2 à 1	52 à 45		12-0-5-5	0°	0,4	12 × 12	< 1
			1 à 4	0,2 à 0,4	45 à 35			0,8	16 × 16	< 2
			4 à 8	0,4 à 0,8	35 à 20			1,2	25 × 25	2 à 3
Ft 30	Perlite moulée	180 à 220°	0,2 à 1	0,1 à 0,2	45 à 40	12-0-5-5	0°	0,4	12 × 12	< 1
			1 à 4	0,2 à 0,4	40 à 30			0,8	16 × 16	< 2
			4 à 8	0,4 à 0,8	30 à 15			1,2	25 × 25	2 à 3
Ft 35	Perlite fine moulée	220 à 260°	0,2 à 1	0,1 à 0,2	30 à 28	12-0-5-5	0°	0,4	12 × 12	< 1
			1 à 4	0,2 à 0,4	28 à 22			0,8	16 × 16	< 2
			4 à 8	0,4 à 0,8	27 à 15			1,2	25 × 25	2 à 3

TABLEAU 2 : Chariotage avec outil en carbure
des aciers non alliés faiblement alliés et des fontes grises

Aciers	Résistance à la rupture (hbar)	Conditions de coupe			Outil carbure (plaquette à jeter)				Tour
		Prof. de passe <i>a</i> (mm)	Avance <i>f</i> (min/tr)	V. de coupe m/min durée d'outil 30 à 45 mn	Nuance ISO	Angle de coupe (degré)	Rayon de bec (mm)	Section du corps de l'outil (mm × mm)	Puissance (kW)
Recuit	< 40	0,2 à 1	0,1 à 0,2	280 à 270	P 20		0,2	12 × 12	< 3
		1 à 4	0,2 à 0,4	270 à 180	P 30		0,8	16 × 16	3 à 20
		4 à 8	0,4 à 0,8	180 à 130	P 40		1,6	25 × 25	20 à 35
Recuit	40 à 60	0,2 à 1	0,1 à 0,2	260 à 250	P 10	14	0,2	12 × 12	< 3
		1 à 4	0,2 à 0,4	250 à 160	P 20	14	0,8	16 × 16	3 à 20
		4 à 8	0,4 à 0,8	160 à 120	P 30	14	1,6	25 × 25	20 à 30
Recuit	60 à 75	0,2 à 1	0,1 à 0,2	200 à 190	P 10	6	0,2	12 × 12	< 3
		1 à 4	0,2 à 0,4	190 à 130	P 20	6	0,8	16 × 16	3 à 15
		4 à 8	0,4 à 0,8	130 à 90	P 30	12	1,6	25 × 25	15 à 30
Trempe revenu	75 à 90	0,2 à 1	0,1 à 0,2	180 à 170	P 10	6	0,2	12 × 12	< 3
		1 à 4	0,2 à 0,4	170 à 120	P 20	6	0,8	16 × 16	3 à 10
		4 à 8	0,4 à 0,8	120 à 80	P 30	12	1,6	25 × 25	10 à 30
Trempe revenu	90 à 110	0,2 à 1	0,1 à 0,2	170 à 160	P 10	0	0,2	12 × 12	< 3
		1 à 4	0,2 à 0,4	160 à 115	P 10	6	0,8	16 × 16	3 à 10
		4 à 8	0,4 à 0,8	115 à 75	P 20	6	1,6	25 × 25	10 à 30
Trempe recuit	110 à 130	0,2 à 1	0,1 à 0,2	160 à 150	P 01	0	0,2	12 × 12	< 2
		1 à 4	0,2 à 0,4	150 à 100	P 10	6	0,8	16 × 16	2 à 10
		4 à 8	0,4 à 0,8	100 à 65	P 20	6	1,6	25 × 25	10 à 20
Trempe revenu	130 à 145	0,2 à 1	0,1 à 0,2	110 à 105	P 01	0	0,2	12 × 12	< 2
		1 à 4	0,2 à 0,4	105 à 75	P 10	0	0,8	16 × 16	2 à 8
		4 à 8	0,4 à 0,8	75 à 50	P 20	6	1,6	25 × 25	8 à 20
Fontes	Dureté (HB)								
Ft 10-15	< 150	0,2 à 1	0,1 à 0,2	260 à 240	K10-M10	-7	0,4	12 × 12	< 2
		1 à 4	0,2 à 0,4	240 à 190	K10-M10	-7	0,8	16 × 16	2 à 10
		4 à 8	0,4 à 0,8	190 à 130	K20-M20	-7	1,6	25 × 25	10 à 30
Ft 20	160 à 200	0,2 à 1	0,1 à 0,2	190 à 180	K10-M10	-7	0,4	12 × 12	< 2
		1 à 4	0,2 à 0,4	180 à 140	K10-M10	-7	0,8	16 × 16	2 à 10
		4 à 8	0,4 à 0,8	140 à 100	K20-M20	-7	1,6	25 × 25	10 à 20
Ft 30	180 à 220	0,2 à 1	0,1 à 0,2	140 à 130	K10-M10	-7	0,4	12 × 12	< 2
		1 à 4	0,2 à 0,4	130 à 110	K10-M10	-7	0,8	16 × 16	2 à 10
		4 à 8	0,4 à 0,8	110 à 80	K20-M20	-7	1,6	25 × 25	10 à 20
Ft 35	220 à 260	0,2 à 1	0,1 à 0,2	110 à 100	K10-M10	-7	0,4	12 × 12	< 1
		1 à 4	0,2 à 0,4	100 à 85	K10-M10	-7	0,8	16 × 16	1 à 7
		4 à 8	0,4 à 0,8	85 à 60	K20-M20	-7	1,6	25 × 25	7 à 15

TABLEAU 3 : Chariotage avec outil

en acier rapide des alliages légers et cuivreux. Durée d'outil 60 à 90 min.

Alliages légers	Dureté (HB)	Conditions de coupe			Acier rapide nuance 6-5-2 (W-D-V)	Outil				
		Prof. de passe (mm)	Avance (mm/tr)	Vitesse de coupe m/min		Angle de coupe γ_0 (degré)	Rayon de bec r_e (mm)	Section du corps de l'outil (mm x mm)		
Légers sans silicium	15	0,2 à 1	0,1 à 0,2	1 000 à 900	Acier rapide nuance 6-5-2 (W-D-V)	20 à 30°	0,5	12 x 12		
	à	1 à 4	0,2 à 0,4	900 à 800			1,2	16 x 16		
	90	4 à 8	0,4 à 0,8	800 à 700			2,0	25 x 25		
Légers avec silicium ($\leq 5\%$)	90	0,2 à 1	0,1 à 0,2	800 à 700		Acier rapide nuance 6-5-2 (W-D-V)	20 à 30°	0,5	12 x 12	
	à	1 à 4	0,2 à 0,4	700 à 650				1,2	16 x 16	
	160	4 à 8	0,4 à 0,8	650 à 600				2,0	25 x 25	
Légers avec silicium ($\leq 13\%$)		0,2 à 1	0,1 à 0,2	600 à 500			Acier rapide nuance 6-5-2 (W-D-V)	20 à 30°	0,5	12 x 12
		1 à 4	0,2 à 0,4	500 à 450					1,2	16 x 16
		4 à 8	0,4 à 0,8	450 à 400					2,0	25 x 25
Alliages cuivreux										
Bronzes Laitons Maillechorts	60	0,2 à 1	0,1 à 0,2	130 à 110	Acier rapide nuance 6-5-2 (W-D-V)			6 à 15°	0,5	12 x 12
	à	1 à 4	0,2 à 0,4	110 à 80					1,2	16 x 16
	100	4 à 8	0,4 à 0,6	80 à 70		2			25 x 25	
Cupro-aluminium Cupro-nickels	130	0,2 à 1	0,1 à 0,2	120 à 100		Acier rapide nuance 6-5-2 (W-D-V)		6 à 15°	0,5	12 x 12
	à	1 à 4	0,2 à 0,4	100 à 75					1,2	16 x 16
	200	4 à 8	0,4 à 0,8	75 à 70			2		25 x 25	

TABLEAU 4 : Vitesse de coupe et d'avance en perçage avec un foret en acier rapide nuance 6-5-2

Matériaux	Vitesse de coupe en m/mm	Angle au sommet du foret et hélice	Avance en mm par tour					
			\varnothing du trou → 2 à 4	5 à 7	8 à 12	13 à 20	21 à 30	
Aciers non alliés et faiblement alliés	$R_m < 450 \text{ N/mm}^2$	28 à 30	$\delta = 118^\circ$ hélice standard	0,08 à 0,12	0,12 à 0,16	0,17 à 0,25	0,26 à 0,3	0,32 à 0,40
	$450 \leq R_m \leq 650$	24 à 26	$\delta = 118^\circ$ hélice standard	0,08 à 0,16	0,12 à 0,16	0,17 à 0,25	0,26 à 0,3	0,32 à 0,40
	$650 \leq R_m < 900$	20 à 20	$\delta = 120^\circ$ hélice standard	0,05 à 0,08	0,10 à 0,12	0,12 à 0,15	0,15 à 0,20	0,25 à 0,30
Fonte grise Ft 10 à Ft 20	40	$\delta = 118^\circ$ hélice standard	0,08 à 0,12	0,12 à 0,16	0,17 à 0,25	0,26 à 0,35	0,35 à 0,40	
Laitons Bronzes Maillechorts	40 à 100	$\delta = 120^\circ$ hélice longue	0,12	0,16	0,25	0,3	0,40	
Alliage d'aluminium laminés (1 050-2 017...) moulés (AS 13-AS 7 G...)	60 à 200	$\delta = 140^\circ$ hélice courte	0,12	0,16	0,25	0,3	0,40	
Matières plastiques	• dures	15 à 35	$\delta = 70^\circ$	0,14	0,18	0,20	0,22	0,25
	• tendres	15 à 25	$\delta = 140^\circ$	0,08	0,10	0,12	0,12	0,16

TABLEAU 5 : Fraisage

Surfaçage en bout, en roulant et en fraisage combiné (fig. 1).

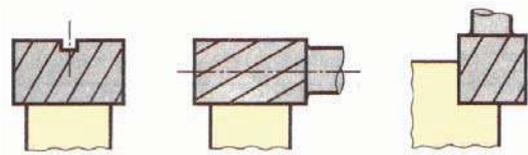


Figure 1

NOTA : A l'exception de la fonte ces valeurs sont données pour un usinage avec lubrification, si l'outil est en acier rapide ou sans lubrification, si l'outil est à plaquette carbure.

Matière	R_m ou HB	Vitesses de coupe moyennes en m/mm	
		Outil en acier rapide*	Outil à plaquette carbure** Nuances
Aciers non alliés ou faiblement alliés	$R_m < 600$	32 à 45	P 10 200 à 235
	$600 < R_m < 800$	25 à 32	150 à 235
	$800 < R_m < 1\ 100$	15 à 25	125 à 150
	$1\ 100 < R_m < 1\ 400$	8 à 15	70 à 125
Fontes grises Ft 10-15 et 20	$110 < HB < 140$	30 à 50	k 20 80 à 100
			M10-20 150 à 160
Fontes grises Ft 25 - Ft 30	$150 < HB < 200$	20 à 30	80 à 100 150 à 160
Fonte malléable	$R_m < 420$	32 à 45	60 à 75 110 à 140
Laitons Bronzes Maillechorts	$60 < HB < 100$	70 à 30	150 à 300
Cupro-aluminiums et cupro-nickels	$130 < HB < 200$	30 à 15	80 à 130
Alliages légers au silicium		300 à 60	k 10 130 à 300
			300 à 600
Alliages légers sans silicium	$15 < HB < 90$	600 à 300	300 à 600

* Acier rapide Z 85 WCDV 6-5-4-2 pour les autres nuances les vitesses restent approximativement les mêmes.

** La nuance de la plaquette carbure à utiliser est fonction : du matériau à usiner, du genre de travail (E, 1/2 F, F) et du mode de travail (production du copeau par choc ou continu). La vitesse de coupe utilisée doit rigoureusement tenir compte de la nuance de la plaquette choisie.

Exercices

Déterminer la vitesse de coupe V_c dans les cas suivants :

1. Chariotage au tour

1.1 Pièce en Ft 20, $a = 3$, $f = 0,2$

Outil :

- en acier rapide ;
- à plaquette carbure M 20.

1.2 Pièce en XC 65 $R_m = 800 \text{ N/mm}^2$, $a = 6$, $f = 0,4$

Outil :

- a) en acier rapide ;
- b) à plaquette carbure P 20.

2. *Surfaçage mixte à la fraise*

2.1 Pièce en AS 13, $a = 5$, $f = 0,3$

Outil :

- a) en acier rapide ;
- b) à plaquette carbure K 10.

2.2 Pièce en 35 CD 4, $R_m = 130 \text{ N/mm}^2$, $a = 1$, $f = 0,1$

Outil à plaquette :

carbure P 10.

3. *Perçage avec un foret hélicoïdal en acier rapide :*

- a) pièce Cu Zn 8 P ;
- b) pièce 2 017 ;
- c) pièce 42 CD 4, $R_m = 900 \text{ N/mm}^2$.

4. La vitesse d'avance en tournage : V_f [mm/min]

Cela correspond à la vitesse de déplacement de l'outil sur la trajectoire d'usinage. C'est cette trajectoire qu'il faut suivre afin que l'outil usine la forme souhaitée.

Unité : V_f en mm/min.

Le choix se fait en fonction des éléments suivants :

Type de travail à réaliser	Etat de surface	Type d'outil	Pièce
Chariotage Alésage, etc	Rugosité Précision	Matériau : carbure acier à coupe rapide céramique	Rigidité (pièces dites déformables) Nature du matériau

5. La profondeur de passe en tournage : a [mm]

La combinaison de V_f et a permet de déterminer le volume du copeau. La profondeur de passe est nécessaire afin de déterminer la quantité de matière qui va être séparée de la pièce sous forme de copeau.

Unité : a en mm.

Le choix se fait en fonction de la surépaisseur de métal à enlever et les limites sont déterminées par :

Limite maximum	Copeau taillé maximum
Puissance de la machine Rigidité pièce et outil Nature du matériau à usiner	Finesse de l'arrête tranchante Forme du bec de l'outil Nature du matériau Etat de la machine

6. Vitesse de rotation . Calcul n (tr/min)

$$V_c \text{ (m/min)} = \pi \cdot D \text{ (m)} \cdot n \text{ (tr/min)}$$

d'où :

$$n \text{ (tr/min)} = \frac{V_c \text{ (m/min)}}{\pi D \text{ (m)}}$$

$$V_c \text{ (m/min)} = \pi \cdot D \text{ (mm)} \cdot n \text{ (tr/min)}$$

d'où :

$$n \text{ (tr/min)} = \frac{V_c \text{ (mm/min)}}{\pi D \text{ (mm)}}$$

Exercices

Matières usinées	V _c	4/3 V _c	Chariotage finition
A 60	50	V _c	Chariotage ébauche
Fonte grise	40	3/4 V _c	Perçage – Alésage
Bronze	100	1/2 V _c	Tronçonnage
Laiton	250	1/3 V _c	Filetage
Alliages légers	300	1/4 V _c	Alésoir machine

- Outil en carbure métallique. Pièce Ft 20 de Ø = 50 mm.

V_c = 150 m/min, déterminée sur le tableau ci-dessus.

$$n \text{ (tr/min)} = \frac{V_c \text{ (mm/min)}}{\pi D \text{ (mm)}} = \frac{150000 \text{ mm/min}}{3 \times 50 \text{ mm}} = 1000 \text{ tr/min} .$$

- Outil en carbure métallique. Pièce A60.

V_c = 200 m/min, donnée par tableau page 16.

$$n \text{ (tr/min)} = \frac{V_c \text{ (mm/min)}}{\pi D \text{ (mm)}} = \frac{200000}{3 \times 75} \cong 890 \text{ tr/min.}$$

7. L'avance en fraisage

L'avance s'exprime par le **déplacement de la pièce en millimètres** pour :

- une dent, c'est l'avance par dent, **fz** ;
- un tour, c'est l'avance par tour, **f** ;
- une minute, c'est l'avance par minute, **Vf** ;

$$Vf = fz \times Z \times n$$

Z : nombre de dents de la fraise ;

n : fréquence de rotation en tr/min.

Les valeurs de **fz** sont indiquées dans le tableau ci-dessous ; elles dépendent principalement de la matière à usiner, du matériau de l'outil et du type de fraise utilisé.

Fraisage de face	Outil A.R.S.			Outil carbure	
	Vc		fz	Vc	fz
	Ebauche	Finition			
Aciers Rm ≤ 70 hbar	22	26	0,15	90	0,2
Aciers Rm de 70 à 100 hbar	18	22	0,12	70	0,2
Aciers Rm de 100 à 120 hbar	16	20	0,1	60	0,15
Fonte Ft 20	22	26	0,15	7	0,25
Fonte GS	16	20	0,12	60	0,2
Laiton	60	80	0,1	220	0,3
Bronze	40	55	0,1	180	0,2
Alliages d'aluminium	100	140	0,1	250	0,2

COEFFICIENTS DE CORRECTION À APPORTER A L'AVANCE PAR DENT fz EN EBAUCHE	
Fraise 1 taille à surfacier : K = 1	Fraise 2 dents à rainurer : K = 0 ,4
Fraise 2 taille à queue : K = 0 ,4	Fraise 3 taille : K = 0 ,4
Fraise 2 taille à trou : K = 0 ,7	Fraise à profil constant : K = 0 ,4
Finition : $fz = \frac{fz}{2}$ (ébauche)	

Application

Calculez V_f pour une opération d'ébauche sur pièce en bronze avec une fraise 2 tailles à queue $\varnothing = 32$, en A.R.S. de $Z = 5$ dents, $n = 400$ tr/min.

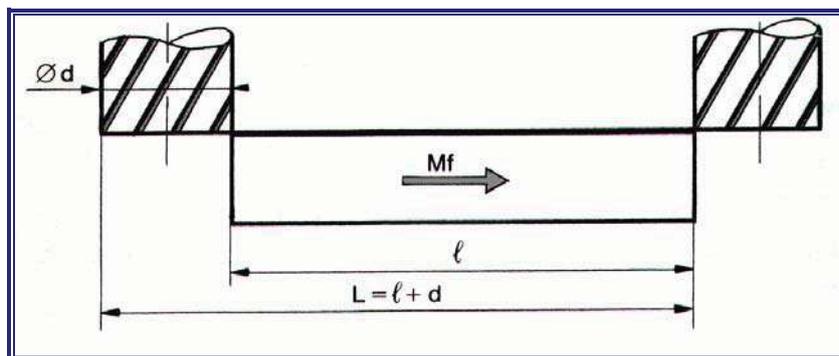
D'après le tableau on trouve $f_z = 0,1$ mm et $V_c = 40$ m/min, $K = 0,4$.

$$f_z = 0,1 \times 0,4 = 0,04 \text{ mm}$$

$$\text{D'où : } V_f = f_z \times Z \times n = 0,04 \times 5 \times 400 = 80 \text{ mm/min}$$

8. Profondeur de passe en fraisage

La profondeur de passe ap dépend de la surépaisseur à usiner, ainsi que de la nature de l'opération (ébauche ou finition). Elle tend à diminuer, lorsque les exigences dimensionnelles, géométriques et d'état de surface deviennent plus rigoureuses. Elle ne doit pas être cependant inférieure au copeau minimum. La valeur maximale de ap est limitée par la rigidité de l'outil et la puissance de la machine.



9. Temps de coupe

Si L représente le longueur de la passe en millimètres, le temps de coupe t_c correspondant pour l'effectuer est déterminé par la relation :

$$t_c = \frac{L}{V_f}$$

t_c : temps de coupe en minutes ;

V_f : avance en mm/min de la pièce.

Exemple

Calculer le temps de coupe pour une opération de surfacage avec une fraise 2 tailles à trous $\varnothing 63$ de $Z = 8$ dents ; vitesse de coupe utilisée $V_c = 16$ m/min ; avance par dent $f_z = 0,1$ mm ; longueur de la pièce $l = 96$ mm.

Solution :

$$n = \frac{1000 V_c}{\pi d} = \frac{1000 \times 16}{3,14 \times 63} = 80 \text{ tr/min}$$

$$V_f = f_z \times Z \times n = 0,1 \times 8 \times 80 = 64 \text{ mm/min}$$

$$L = l + d = 96 + 63 = 159 \text{ mm}$$

Temps de coupe :

$$t_c = \frac{L}{V_f} = \frac{159}{64} = \mathbf{2 \text{ min } 30 \text{ s}}$$

Maintenant on va mettre en place ces paramètres de coupe dans le cas du tournage et du fraisage.

10. Réglage des conditions de coupe

Maintenant il faut **régler les conditions de coupe sur la machine**. En fait on n'agit que sur 3 paramètres :

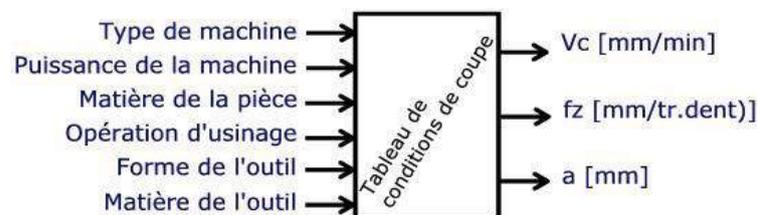
N : le taux de rotation de la pièce en tournage, ou de l'outil en fraisage ;

V_f : la vitesse d'avance suivant la trajectoire d'usinage, en fait on détermine d'abord f_z ;

a : la profondeur de passe.

Il est donc nécessaire de déterminer les relations entre V_c , V_f et N . On fixera la profondeur de passe, a , suivant une valeur maximum donnée par le tableau.

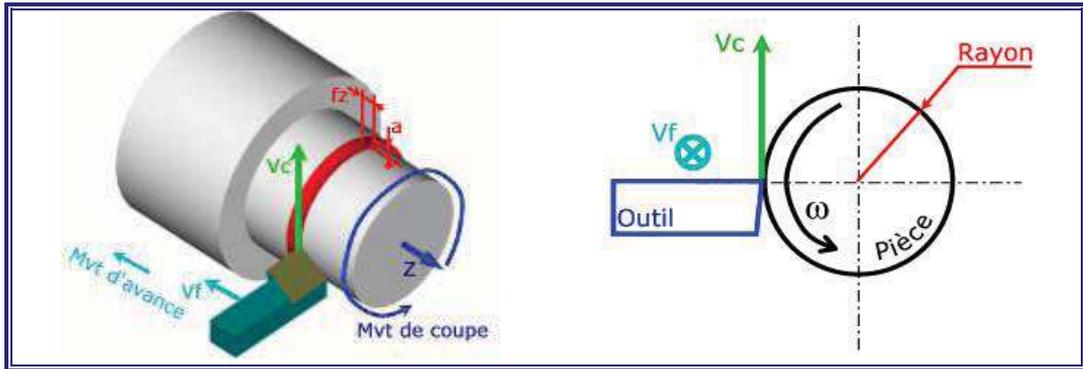
Vous disposerez d'un tableau de caractéristiques de coupe. Il permet de définir V_c , f_z et a en fonction du type de machine, de l'outil, de la matière.



11. Le cas du tournage

Le mouvement de coupe anime la pièce (pièce tournante). On en déduit la vitesse de coupe V_c .

Le mouvement d'avance est un mouvement de translation de l'outil par rapport à la pièce. On en déduit V_f .



5.1 La vitesse de coupe

On cherche à déterminer la relation entre la vitesse de coupe, V_c , et le taux de rotation, ω de la pièce. C'est une formule que vous connaissez bien.

Relation entre ω et V_c en utilisant les unités internationales : $V_c = R\omega \Rightarrow \omega = \frac{V_c}{R}$ avec V_c en m/s, R en m et ω en rd/s.

Cependant, en usinage, on utilise les unités suivantes :

- V_c en m/min, D en m et N en tr/min ;
- on utilise le diamètre au lieu du rayon ;
- on utilise un taux de rotation, N , exprimé en tour par minute au lieu de, ω , en rd/s.

La formule devient : $N = \frac{1000 V_c}{\pi D}$.

Le diamètre correspond à la position de la pointe de l'outil. Il y a 2 cas de figure :

- On usine parallèlement à l'axe de broche. La surface générée est un cylindre $\Rightarrow D = \text{diamètre du cylindre}$;
- On usine perpendiculairement à l'axe de broche. La surface générée est un plan $\Rightarrow D = 2/3 \text{ diamètre maxi du plan}$.

5.2 La vitesse d'avance

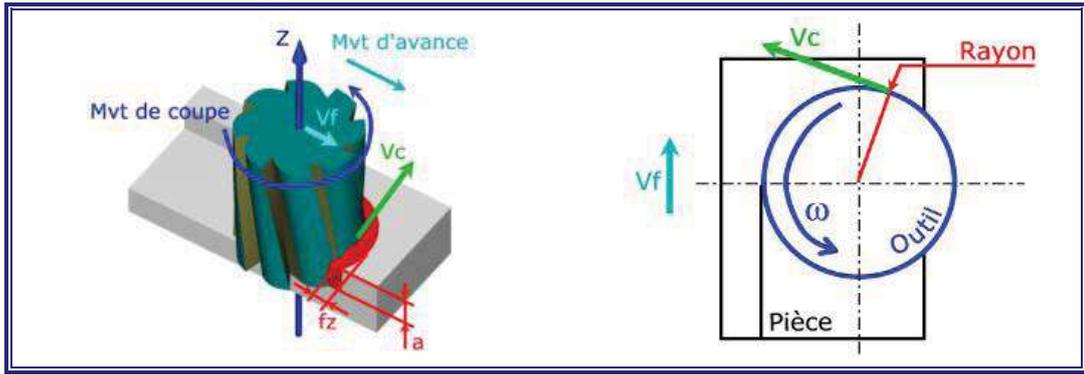
Voici maintenant la relation entre la vitesse d'avance et le taux de rotation : $V_f = fz \cdot N$

V_f en mm/min, fz en mm/(tr. dent) et N en tr/min.

fz correspond à la capacité de coupe de l'arête de coupe (la dent) pour une rotation de 1 tour de la pièce. En d'autre terme, fz correspond à la distance que l'arête de coupe va parcourir à chaque tour de la pièce.

12. Cas du fraisage

Le mouvement de coupe anime l'outil (fraise tournante). Le mouvement d'avance est un mouvement de translation de l'outil.



6.1 La vitesse de coupe

On cherche à déterminer la relation entre la vitesse de coupe, V_c , et le taux de rotation, ω , de la fraise. C'est une formule que vous connaissez bien.

Relation entre ω et V_c en utilisant les unités internationales : $V_c = R\omega \Rightarrow \omega = \frac{V_c}{R}$, V_c en m/s, R en m et ω en rd/s.

Cependant, en usinage, on utilise les unités suivantes :

- V_c en m/min, D en m et N en tr/min ;
- on utilise le diamètre au lieu du rayon ;
- on utilise un taux de rotation, N , exprimé en tour par minute au lieu de, ω , en rd/s.

La formule devient : $N = \frac{1000 V_c}{\pi D}$, D correspond au diamètre de la fraise.

6.2 La vitesse d'avance

Voici maintenant la relation entre la vitesse d'avance et le taux de rotation : $V_f = z \cdot f_z \cdot N$

z est le nombre de dents de la fraise, V_f en mm/min, f_z en mm/(tr.dent) et N en tr/min.

f_z correspond à la capacité de coupe de l'arête de coupe (la dent) pour une rotation de 1 tour de l'outil. En d'autre terme, f_z correspond à la distance que la dent va parcourir à chaque tour de la fraise. Sur une fraise il peut y avoir plusieurs dents, donc plusieurs arêtes de coupe. On prend donc en compte ce nombre : z .

13. Formulaire

V_c en m/min, D en m et N en tr/min.

$N = \frac{1000 V_c}{\pi D}$, D correspond au diamètre de la surface usinée ou de la fraise ; z est le nombre

de dents de l'outil, V_f en mm/min, f_z en mm/(tr.dent) et N en tr/min.

$$V_f = z \cdot f_z \cdot N,$$

avec $z = 1$ en tournage puisqu'il n'y a qu'une seule arête de coupe (1 seule dent).

14. Tableau des conditions de coupe

$$N = \frac{1000 V_c}{\pi D}$$

V_c en m/min, D en m et N en tr/min.
 z est le nombre de dents de l'outil.

$$V_f = z \cdot f_z \cdot N$$

V_f en mm/min, f_z en mm/(tr.dent).

TOURNAGE (Attention : pour les gorges et le tronçonnage : prendre 50% des valeurs de tournage ci dessous)													
Matières	Rr MPa	Outil ARS						Outil Carbure					
		γ	Ebauche			Finition		γ	Ebauche			Finition	
			V60 m/min	a max mm	f mm/tr	V60 m/min	f mm/tr		V60 m/min	a max mm	f mm/tr	V60 m/min	f mm/tr
Acier S235	500	18°	30	2	0.1	45	>0.04	14°	150	2	0.2	250	>0.10
Acier INOX	500	14°	27	2	0.1	32	>0.04	6°	105	2	0.2	115	>0.10
Acier 35CD4	1100	10°	20	2	0.1	28	>0.04	0°	100	2	0.2	160	>0.10
PVC	60	15°	90	4	0.3	150	>0.10	8°	100	4	0.3	150	>0.20
Nylon PA6	80	15°	90	2	0.2	120	>0.05	5°	100	2	0.35	180	>0.12
Plexi PMMA	78	15°	75	2	0.2	90	>0.10	10°	100	2	0.25	150	>0.12
Laiton UZ30	400	10°	70	1	0.3	110	>0.02	20°	200	2	0.3	230	>0.10
BronzeUE12P	200	10°	32	2	0.2	43	>0.02	20°	90	2	0.3	120	>0.10
Dural AU4G	280	22°	200	2	0.3	250	>0.02	25°	400	3	0.4	500	>0.10

FRAISAGE EN BOUT (surfaçage)													
Matières	Rr MPa	Fraises ARS						Plaquettes Carbure					
		γ	Ebauche			Finition		γ	Ebauche			Finition	
			V60 m/min	a max mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)		V60 m/min	a mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)
Acier S235	500	20°	29	2	0.11	40	>0.06	20°	100	2	0.2	120	>0.07
Acier INOX	500	20°	18	2	0.08	22	>0.05	15°	72	2	0.15	92	>0.07
Acier 35CD4	1100	12°	20	2	0.06	25	>0.04	12°	80	2	0.12	90	>0.07
PVC	60	20°	200	4	0.2	300	>0.50	20°	800	4	0.3	1000	>0.07
Nylon PA6	80	20°	100	2	0.15	200	>0.20	20°	400	2	0.35	500	>0.07
Plexi PMMA	78	0°	60	2	0.15	80	>0.20						
Laiton UZ30	400		72	1	0.09	95	>0.07		130	2	0.5	180	>0.16
BronzeUE12P	200		23	1	0.07	31	>0.06		60	2	0.2	82	>0.16
Dural AU4G	280	20°	150	1	0.07	190	>0.06	20°	500	3	0.1	800	>0.08

FRAISAGE EN ROULANT (rainurage, combiné...)													
Matières	Rr MPa	Fraises A.R.S. ($\varnothing > 20$)						Fraises A.R.S. ($\varnothing < 20$)					
		γ	Ebauche			Finition		γ	Ebauche			Finition	
			V60 m/min	a maxi mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)		V60 m/min	a maxi mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)
Acier S235	500	20°	25	2	0.08	32	>0.05	20°	19	2	0.03	22	>0.03
Acier INOX	500	20°	24	2	0.06	28	>0.04	20°	16	2	0.03	18	>0.03
Acier 35CD4	1100	20°	18	2	0.04	24	>0.03	12°	16	2	0.03	20	>0.03
Laiton UZ30	400	10	72	2	0.16	90	>0.03		41	3	0.01	46	>0.01
BronzeUE12P	200	10	30	2	0.18	35	>0.03		18	3	0.01	22	>0.01
Dural AU4G	280	20°	240	2	0.07	270	>0.06	20°	95	5	0.05	105	>0.03

PERÇAGE, ALÉSAGE													
Matières	Rr MPa	Forets et alésoirs ARS						Tarauds A.R.S.					
		γ	Perçage			$\varnothing < 10$ $\varnothing > 10$		Alésage $\varnothing < 20$			Tarauds A.R.S.		
			V60 m/min	angle pointe	angle hélice	f mm/tr	f mm/tr	V60 m/min	a mm	f mm/tr	V60 m/min	Lubrifiant	
Acier S235	500	25°	25	135°	30°	0.025 ϕ	>0.05	8	>0.20	0.3	12	Huile de coupe	
Acier INOX	500	25°	20	120°	30°	0.02 ϕ	>0.04	8	>0.20	0.15	6	Huile soluble	
Acier 35CD4	1100	25°	22	120°	30°	0.012 ϕ	>0.03	9	>0.20	0.17	10	Huile de coupe	
PVC	60		60	135°	30°	0.02 ϕ		non	non	non	15	Air comprimé	
Nylon PA6	80	0°	30	100°	30°	0.02 ϕ		non	non	non	15	Air comprimé	
Plexi PMMA	78	0°	40	140°	30°	0.02 ϕ		non	non	non	10	Air comprimé	
Laiton UZ30	400	18°	45	120°	15°	0.03 ϕ	>0.03	30	>0.20	0.4	13	a sec	
BronzeUE12P	200	10°	20	120°	30°	0.037 ϕ	>0.03	12	>0.20	0.9	7	Huile de coupe	
Dural AU4G	280	35°	65	140°	30°	0.032 ϕ	>0.06	30	>0.20	0.4	18	Pétrole	



Pour tout type de perçage, tournage ou fraisage, la vitesse de rotation peut être déterminée :

➤ par le calcul suivant :

$$N = \frac{1000 \times V_c}{3,14 \times \varnothing}$$

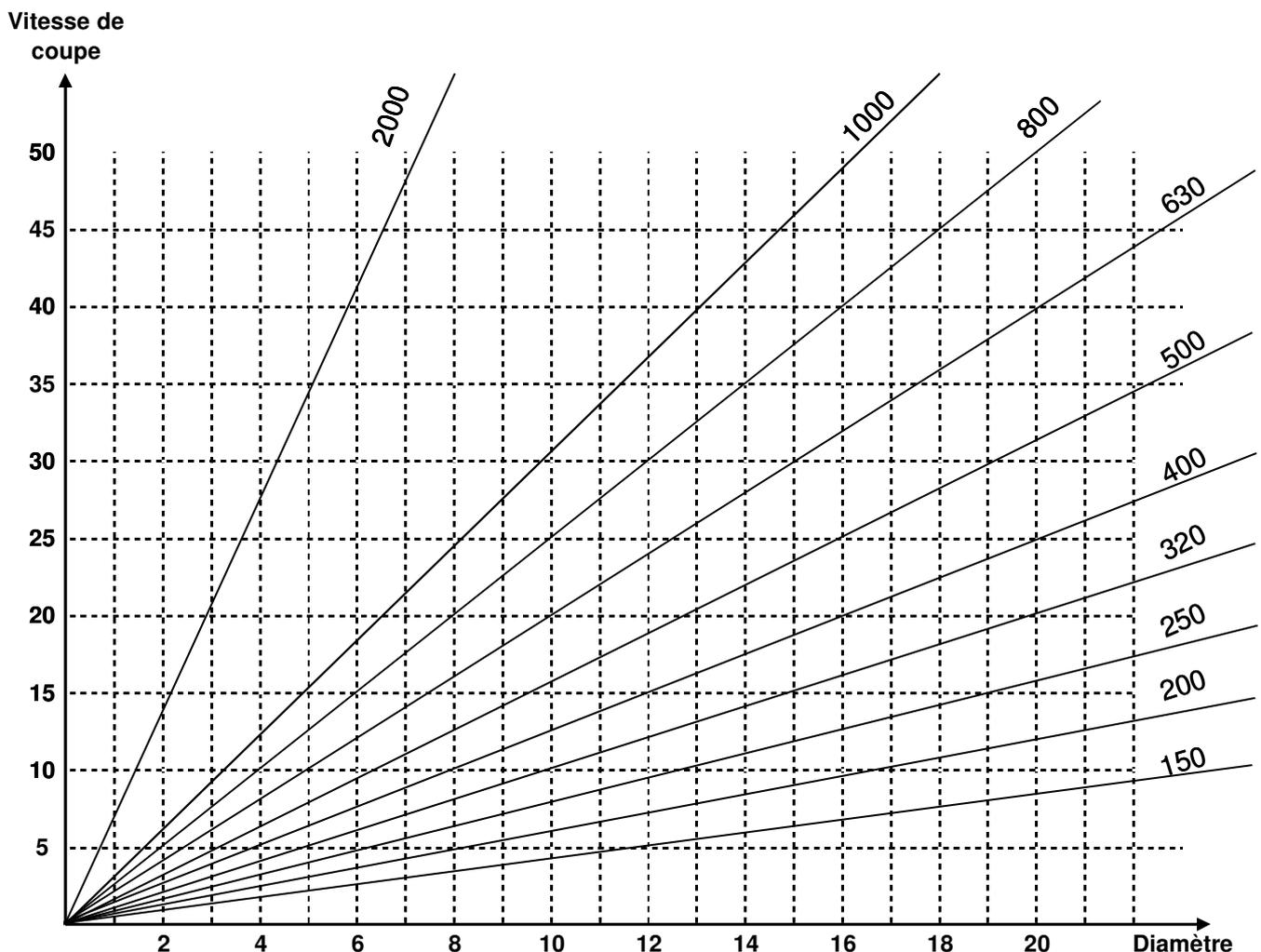
N = vitesse de rotation (en tours par minute = Tr / min)

D = diamètre du foret (en mm)

V_c = vitesse de coupe (en mètres par minute = m / min)

Matériaux	Vitesse de coupe
Fonte	10 m / min
Acier R<90daN/mm ²	20 m / min
Acier R>90daN/mm ²	10 m / min
Laiton	40 m / min
Aluminium	100 m / min

➤ ou alors, grâce à l'abaque suivant :





Exemples de déterminations de vitesse de rotation :

➤ par le calcul suivant :

$$N = \frac{1000 \times V_c}{3,14 \times \varnothing}$$

Perçage d'une pièce en laiton avec un forêt de \varnothing 8 mm

$$N = \frac{1000 \times 40}{3,14 \times 8}$$

N = 1592 Tr / min

Fraisage d'une pièce en acier R<90 avec une fraise de \varnothing 6 mm

$$N = \frac{1000 \times 20}{3,14 \times 6}$$

N = 1061 Tr / min

Perçage d'une pièce en acier R>90 avec un forêt de \varnothing 12 mm

$$N = \frac{1000 \times 10}{3,14 \times 12}$$

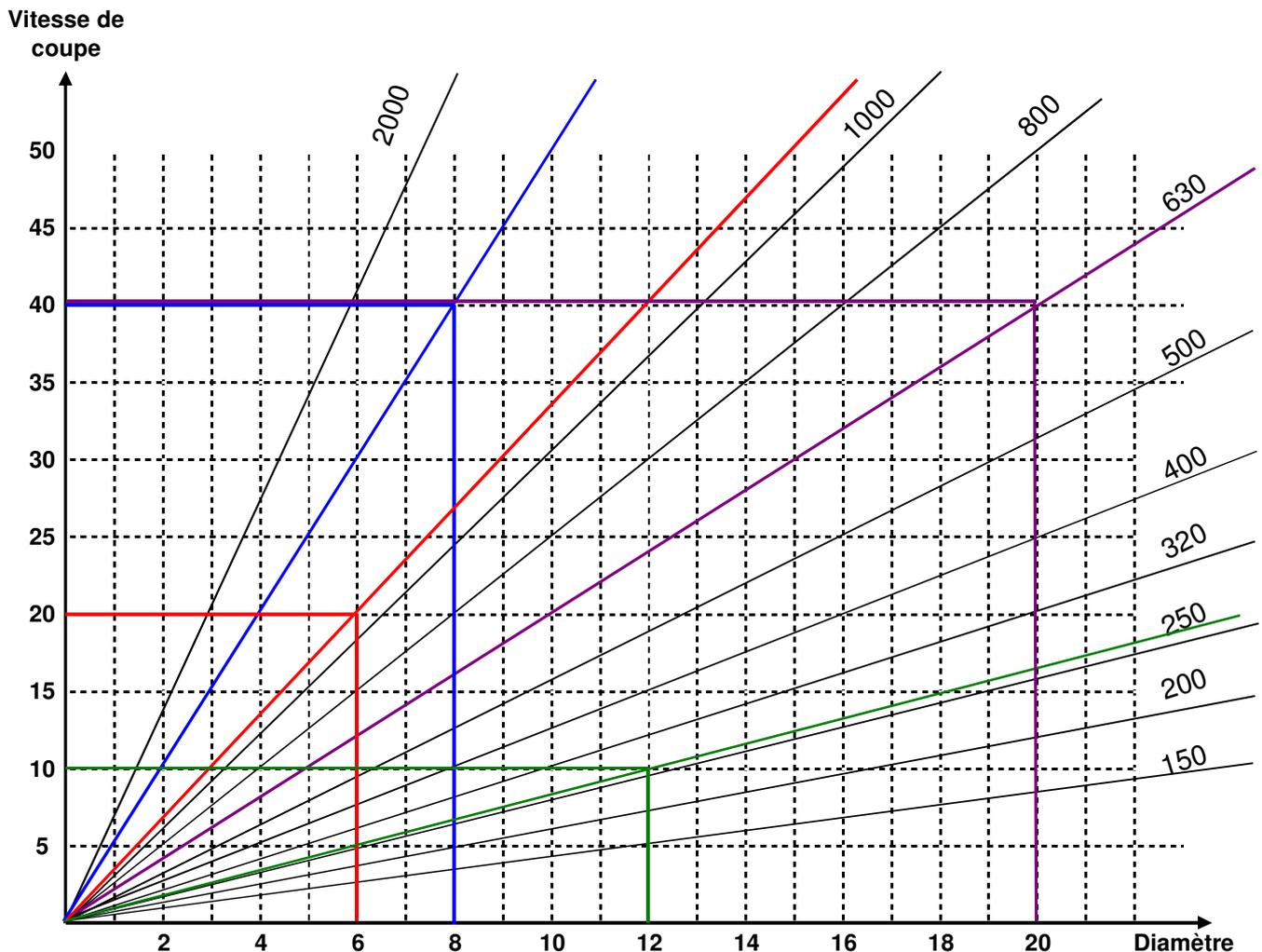
N = 265 Tr / min

Fraisage d'une pièce en laiton avec une fraise de \varnothing 20 mm

$$N = \frac{1000 \times 40}{3,14 \times 20}$$

N = 636 Tr / min

➤ ou alors, grâce à l'abaque suivant :



BEP MSMA	S	USINAGE
Nom : _____	1 / 2	LA VITESSE DE COUPE

Réglage de la fréquence de rotation :

a°) Formule :

$$N = \frac{1000 \times Vc}{\pi \times D}$$

- **N : fréquence de rotation (tr/min)**
- **Vc : vitesse de coupe (m/min)**
- **D : diamètre de l'outil (mm)**

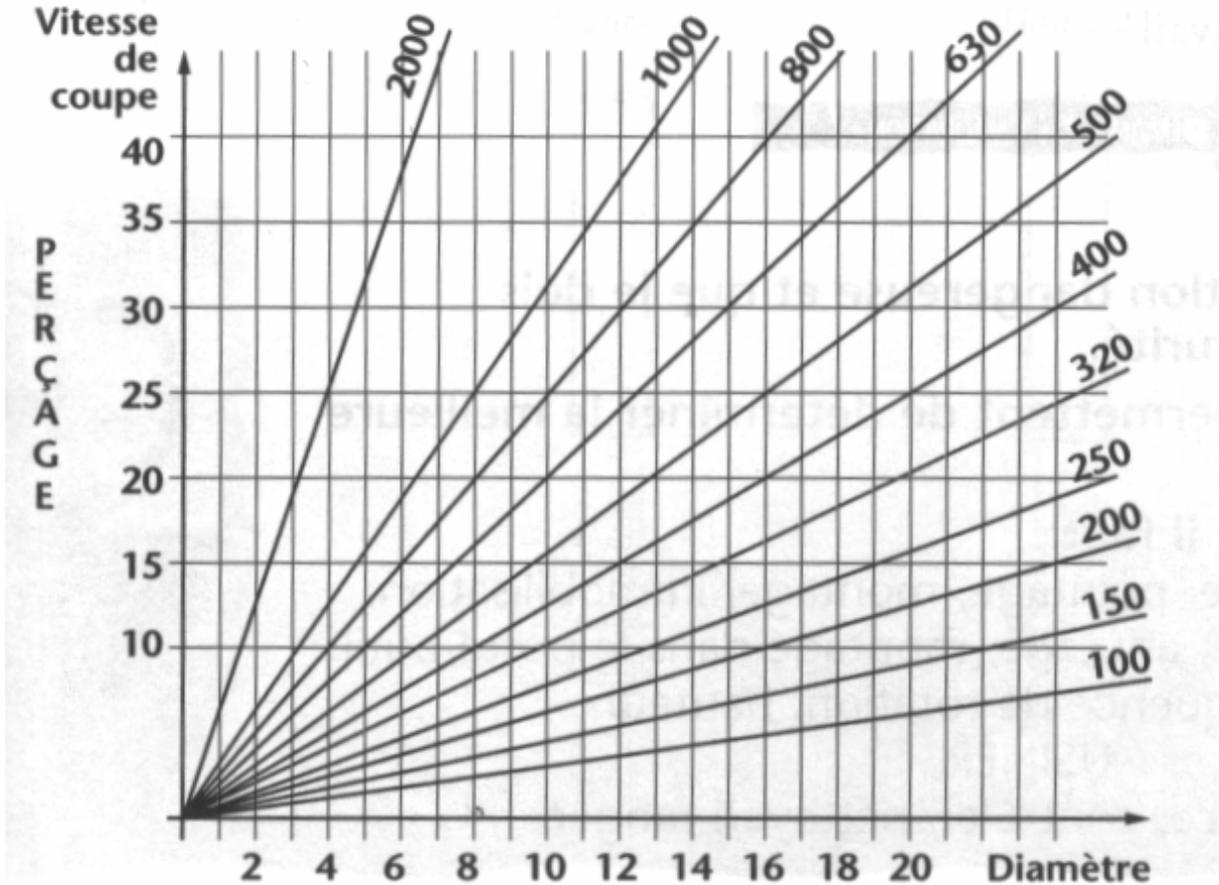
b°) Tableau de vitesse de coupe en fonction de la matière :

MATIERE	V (m / min)
Matière plastique dure	15 - 30
Matière plastique tendre	15 - 20
Aluminium	60 - 150
Cuivre	40 - 70
Bronze (cuivre + étain)	25 - 60
Laiton (cuivre + zinc)	20 - 100
Acier courant : E24	25 - 35
Acier de construction : XC40	20

Matériaux	Vitesse de coupe
C 35 E (acier)	20 m/min
Fonte	18 m/min
Laiton	40 m/min
Aluminium	100 m/min

BEP MSMA	S	USINAGE
Nom : _____	2 / 2	LA VITESSE DE COUPE

Pour choisir la meilleure fréquence de rotation, sans avoir à effectuer de calculs, on utilise un abaque comme celui présenté ci-dessous (cette abaque est différente de nos perceuses, mais le principe est identique)



Comment utiliser l'abaque ?

Choisir la ligne de la vitesse de coupe.

Choisir la colonne du diamètre du foret.

Si l'intersection se trouve entre deux lignes obliques, choisir celle qui indique la plus petite fréquence de rotation.

Si la machine ne permet pas cette vitesse, choisir la plus proche.

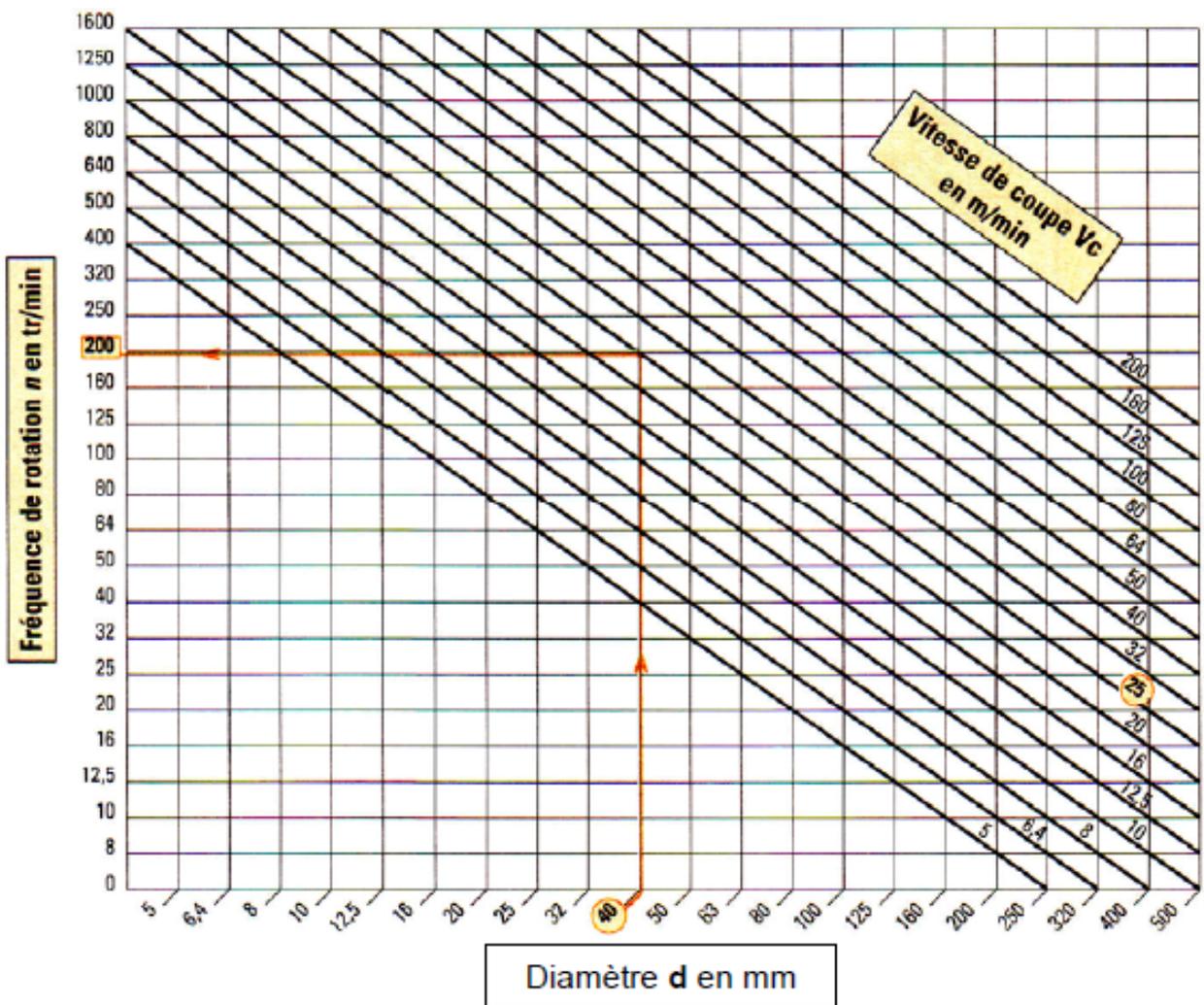
Exemple : un foret de 10 mm de diamètre perçant de l'acier (20 m/min) devra tourner à 630 tours/min.

TD no. 05 : Calcul des conditions de coupe

Exercice I : Calculer les différentes fréquences de rotation :

- a- En tournage, à quelle vitesse doit tourner une pièce de diamètre 35 mm avec une vitesse de coupe $V_c = 80 \text{ m/min}$
- b- En tournage, à quelle vitesse doit tourner une pièce de diamètre 8 mm avec une vitesse de coupe $V_c = 80 \text{ m/min}$
- c- En fraisage, à quelle vitesse doit tourner une fraise de diamètre 16 mm avec une vitesse de coupe $V_c = 25 \text{ m/min}$
- d- En fraisage, à quelle vitesse doit tourner une fraise de diamètre 6 mm avec une vitesse de coupe $V_c = 65 \text{ m/min}$

Exercice II : Déterminer la fréquence de rotation : Graphiquement à l'aide d'un abaque



- Déterminer la fréquence de rotation de la broche d'un tour pour les conditions suivantes : $V_c = 25 \text{ m/min}$ et $d = 40 \text{ mm}$
 - Par calcul
 - Graphiquement
- Déterminer la vitesse d'avance V_f pour une avance : $f = 0,2 \text{ mm/tr}$

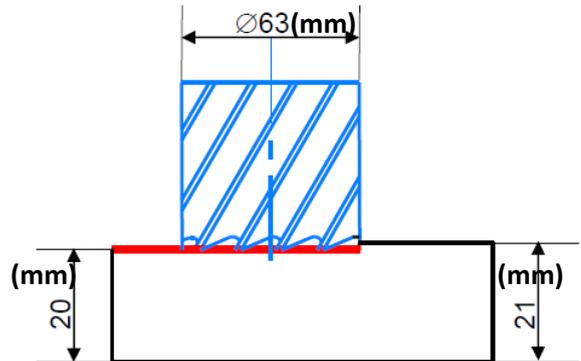
Exercice III : Opération de surfacage

Données :

- Opération de surfacage
- Matière de la pièce : AU-4G (duralumin)
- ($V_c = 100 \text{ m/min}$).
- Fraise ARS – 5 dents
- Avance $f_z = 0,08 \text{ mm/dt}$.

1) Calculer la fréquence de rotation n .

2) Calculer la vitesse d'avance V_f .

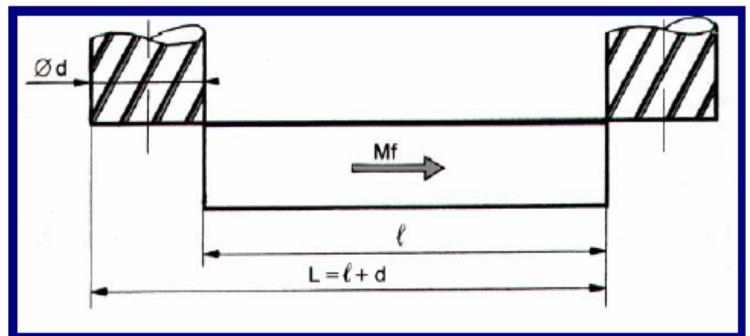


Exercice IV : Temps de coupe

Si L représente le longueur de la passe en millimètres, le temps de coupe t_c correspondant pour l'effectuer est déterminé par la relation :

$$t_c = \frac{L}{V_f}$$

t_c : temps de coupe en minutes ;
 V_f : avance en mm/min de la pièce.



Application :

Calculer le temps de coupe pour une opération de surfacage avec une fraise 2 tailles à trous $\varnothing 63\text{mm}$ de $Z = 8$ dents ; vitesse de coupe utilisée $V_c = 16 \text{ m/min}$; avance par dent $f_z = 0,1 \text{ mm}$; longueur de la pièce $l = 96 \text{ mm}$.

Tableau des conditions de coupe

$$N = \frac{1000 Vc}{\pi D}$$

Vc en m/min, D en m et N en tr/min.
z est le nombre de dents de l'outil.

$$Vf = z \cdot fz \cdot N$$

Vf en mm/min, fz en mm/(tr.dent).

TOURNAGE (Attention : pour les gorges et le tronçonnage : prendre 50% des valeurs de tournage ci dessous)													
Matières	Rr MPa	Outil ARS					Outil Carbure						
		γ	Ebauche			Finition		γ	Ebauche			Finition	
			V60 m/min	a max mm	f mm/tr	V60 m/min	f mm/tr		V60 m/min	a max mm	f mm/tr	V60 m/min	f mm/tr
Acier S235	500	18°	30	2	0.1	45	>0.04	14°	150	2	0.2	250	>0.10
Acier INOX	500	14°	27	2	0.1	32	>0.04	6°	105	2	0.2	115	>0.10
Acier 35CD4	1100	10°	20	2	0.1	28	>0.04	0°	100	2	0.2	160	>0.10
PVC	60	15°	90	4	0.3	150	>0.10	8°	100	4	0.3	150	>0.20
Nylon PA6	80	15°	90	2	0.2	120	>0.05	5°	100	2	0.35	180	>0.12
Plexi PMMA	78	15°	75	2	0.2	90	>0.10	10°	100	2	0.25	150	>0.12
Laiton UZ30	400	10°	70	1	0.3	110	>0.02	20°	200	2	0.3	230	>0.10
BronzeUE12P	200	10°	32	2	0.2	43	>0.02	20°	90	2	0.3	120	>0.10
Dural AU4G	280	22°	200	2	0.3	250	>0.02	25°	400	3	0.4	500	>0.10

FRAISAGE EN BOUT (surfaçage)													
Matières	Rr MPa	Fraises ARS					Plaquettes Carbure						
		γ	Ebauche			Finition		γ	Ebauche			Finition	
			V60 m/min	a max mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)		V60 m/min	a mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)
Acier S235	500	20°	29	2	0.11	40	>0.06	20°	100	2	0.2	120	>0.07
Acier INOX	500	20°	18	2	0.08	22	>0.05	15°	72	2	0.15	92	>0.07
Acier 35CD4	1100	12°	20	2	0.06	25	>0.04	12°	80	2	0.12	90	>0.07
PVC	60	20°	200	4	0.2	300	>0.50	20°	800	4	0.3	1000	>0.07
Nylon PA6	80	20°	100	2	0.15	200	>0.20	20°	400	2	0.35	500	>0.07
Plexi PMMA	78	0°	60	2	0.15	80	>0.20						
Laiton UZ30	400		72	1	0.09	95	>0.07		130	2	0.5	180	>0.16
BronzeUE12P	200		23	1	0.07	31	>0.06		60	2	0.2	82	>0.16
Dural AU4G	280	20°	150	1	0.07	190	>0.06	20°	500	3	0.1	800	>0.08

FRAISAGE EN ROULANT (rainurage, combiné...)													
Matières	Rr MPa	Fraises A.R.S. (∅ >20)					Fraises A.R.S. (∅ < 20)						
		γ	Ebauche			Finition		γ	Ebauche			Finition	
			V60 m/min	a maxi mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)		V60 m/min	a maxi mm	fz mm/(tr.d)	V60 m/min	fz mm/(tr.d)
Acier S235	500	20°	25	2	0.08	32	>0.05	20°	19	2	0.03	22	>0.03
Acier INOX	500	20°	24	2	0.06	28	>0.04	20°	16	2	0.03	18	>0.03
Acier 35CD4	1100	20°	18	2	0.04	24	>0.03	12°	16	2	0.03	20	>0.03
Laiton UZ30	400	10	72	2	0.16	90	>0.03		41	3	0.01	46	>0.01
BronzeUE12P	200	10	30	2	0.18	35	>0.03		18	3	0.01	22	>0.01
Dural AU4G	280	20°	240	2	0.07	270	>0.06	20°	95	5	0.05	105	>0.03

PERÇAGE, ALÉSAGE												
Matières	Rr MPa	Forets et alésoirs ARS						Tarauds A.R.S.				
		γ	Perçage			Alésage		∅ < 20		V60 m/min	Lubrifiant	
			V60 m/min	angle pointe	angle hélice	∅ < 10 f mm/tr	∅ > 10 f mm/tr	V60 m/min	a mm			f mm/tr
Acier S235	500	25°	25	135°	30°	0.025Φ	>0.05	12.5	>0.20	0.3	12	Huile de coupe
Acier INOX	500	25°	20	120°	30°	0.02Φ	>0.04	8	>0.20	0.15	6	Huile soluble
Acier 35CD4	1100	25°	22	120°	30°	0.012Φ	>0.03	9	>0.20	0.17	10	Huile de coupe
PVC	60		60	135°	30°	0.02Φ		non	non	non	15	Air comprimé
Nylon PA6	80	0°	30	100°	30°	0.02Φ		non	non	non	15	Air comprimé
Plexi PMMA	78	0°	40	140°	30°	0.02Φ		non	non	non	10	Air comprimé
Laiton UZ30	400	18°	45	120°	15°	0.03Φ	>0.03	30	>0.20	0.4	13	a sec
BronzeUE12P	200	10°	20	120°	30°	0.037Φ	>0.03	12	>0.20	0.9	7	Huile de coupe
Dural AU4G	280	35°	65	140°	30°	0.032Φ	>0.06	30	>0.20	0.4	18	Pétrole